

NOTE TO USERS

The original manuscript received by UMI contains pages with indistinct and/or slanted print. Pages were microfilmed as received.

This reproduction is the best copy available

UMI

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CIRCUIT D' ESSAI POUR LIMITEUR
DE COURANT SUPRACONDUCTEUR

RAPHAËL NADI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ET DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

JUIN 1997



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-33164-4

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

CIRCUIT D' ESSAI POUR LIMITEUR
DE COURANT SUPRACONDUCTEUR

présenté par: NADI Raphaël

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. BOUCHARD Réal-Paul, M.Sc.A., président

M. OLIVIER Guy, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. CAVE Julian, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. ST-JEAN Guy, M.Sc.A, membre

REMERCIEMENTS

Je remercie le groupe supraconductivité de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) composé de Julian R. Cave, Dag W.A. Willén et Wen Zhu de l'accueil et de la collaboration dont ils ont fait preuve durant mon séjour dans leur équipe.

Je remercie Yves Brissette et Michel Landry, tous deux chercheurs au service Appareillage électrique de l'IREQ, de leur aide précieuse dans l'éclaircissement de questions relatives aux réseaux de distribution d'énergie électrique.

Je remercie particulièrement mon codirecteur de recherche, Julian Cave, pour son concours dans la supervision de mon projet de maîtrise et pour les moyens qu'il a mis à ma disposition. Ma reconnaissance va également à Guy Olivier, professeur d'électrotechnique à l'École Polytechnique de Montréal dont le support logistique et les conseils ont facilité mon cheminement d'étudiant au sein de l'École.

J'exprime aussi ma gratitude auprès des deux institutions, Hydro-Québec et le Centre de Développement Technologique (C.D.T.) de l'École Polytechnique, responsables de la convention de recherche et du financement de mes travaux. À ce propos, je suis spécialement reconnaissant à Raymond Roberge, chef de service Technologie des matériaux à l'IREQ et Louis Taillefer, coordonnateur de projets au C.D.T dont la médiation persistante a finalement débouché sur une entente contractuelle.

Enfin, je ne saurais oublier les membres du jury, notamment Monsieur Réal-Paul Bouchard et Monsieur Guy St-Jean, que je remercie de l'assiduité et du temps qu'ils ont investis dans la lecture et la correction de ce document.

RÉSUMÉ

La limitation des courants de court-circuit est un facteur clé de la sécurité du personnel, de la qualité de l'onde et de la fiabilité des réseaux électriques. Les sociétés d'électricité financent un grand nombre d'études visant la mise au point de limiteurs de courant viables pour les réseaux de distribution. L'avènement des matériaux supraconducteurs à l'azote liquide a renouvelé l'intérêt des conceptions de limiteur de courant utilisant les propriétés uniques de ces matériaux. Hydro-Québec et Siemens collaborent depuis trois ans au développement et à la commercialisation d'un limiteur basé sur les supraconducteurs à haute température. Dans le cadre de la phase I de ce partenariat, plusieurs prototypes supraconducteurs de limiteur de courant ont été fabriqués et évalués.

Les étapes de ce projet de maîtrise consistent à concevoir, à assembler et à valider un banc d'essai capable de soumettre des petits prototypes de limiteur de courant à des conditions comparables à celles présentes sur une ligne de distribution. En outre, le banc d'essai est utilisé pour caractériser les performances de ces prototypes afin d'en dégager les faiblesses et de recommander les améliorations à apporter aux conceptions futures.

Le circuit d'essai sera utilisé dans une version modifiée, pour les essais de sous-ensembles du prochain limiteur supraconducteur de courant prévu dans l'entente Hydro-Québec/Siemens.

ABSTRACT

Fault current limitation is a key factor in workers safety, power quality and electrical network reliability. Power utilities are supporting numerous projects that aim to develop a cost effective fault current limiter for distribution systems. The discovery of materials that are superconducting at liquid nitrogen temperature has renewed the interest in several designs of fault current limiters that use the unique properties of such materials. Hydro-Québec and Siemens have been working together for three years in the development and marketing of a fault current limiter based on high temperature superconductors. Within phase I of this cooperation agreement, several superconducting fault current limiter prototypes have been built and tested.

The tasks of this master thesis project are to design, assemble and validate a test facility capable of applying to small fault current limiter prototypes the same conditions that exist on distribution feeders. In addition, the test facility is used to characterise the behaviour of prototypes to the extent of revealing their weaknesses and to advise improvements in future generation prototypes.

The test circuit will be used, in a modified version, for testing of components of the next superconducting fault current limiter within the Hydro-Québec/Siemens partnership.

TABLES DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT.....	VI
TABLES DES MATIÈRES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	XIII
LISTE DES ANNEXES.....	XVI
AVANT-PROPOS.....	XVII
INTRODUCTION.....	1
1. LES COURANTS DE DÉFAUT EN DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE.....	3
1.1 ORGANISATION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.....	3
1.2 CARACTÉRISTIQUES DES DÉFAUTS EN DISTRIBUTION	5
1.2.1 Aspect typique d'un courant de défaut	5
1.2.2 Effets thermiques d'un défaut	8
1.3 PROTECTION CONTRE LES SURINTENSITÉS	9
1.4 LIMITATION DU COURANT DE DÉFAUT.....	10

1.5 PERFORMANCES RECHERCHÉES D'UN LIMITEUR DE COURANT	11
2. CARACTÉRISTIQUES D'UN LIMITEUR SUPRACONDUCTEUR DE COURANT ...	12
2.1 LES SUPRACONDUCTEURS ET LA LIMITATION DE COURANT	12
2.1.1 Historique	12
2.1.2 Explication physique de la supraconduction	14
2.1.3 Température d'opération	15
2.1.4 Surfaces critiques d'un supraconducteur à haute température	16
2.2 PRINCIPE DE LA CONFIGURATION "NOYAU DE FER BLINDÉ" (NFB)	17
3. UN CIRCUIT D'ESSAI DE LIMITEUR DE COURANT SUPRACONDUCTEUR	23
3.1 GÉNÉRALITÉS SUR LE CIRCUIT D'ESSAI	23
3.2 CHOIX DE L'ÉQUIPEMENT DE PUISSANCE	24
3.2.1 La source d'alimentation	24
3.2.2 Les transformateurs abaisseurs de tension	25
3.2.3 La charge de 100 kW	26
3.2.4 Le disjoncteur à déclenchement commandé	28
3.2.5 Les contacteurs d'alimentation et de court-circuit	28
3.3 PROTECTION DES PERSONNES ET DE L'ÉQUIPEMENT	29
3.3.1 Protection périmétrique	29
3.3.2 Barrière d'isolation de signaux	29
3.3.3 Protection contre la surcharge et les courts-circuits	30
3.3.4 Sécurité câblée sur la durée du défaut	30
3.4 INSTRUMENTATION ET ACQUISITION DE DONNÉES	30
3.4.1 Les capteurs de mesure	31
3.4.2 Conditionnement local des signaux	32
3.4.3 Contrôle et acquisition de données	33

3.5 MISE EN SERVICE DU CIRCUIT D'ESSAI	33
3.5.1 Séquence d'un essai en charge avec défaut.....	33
3.5.2 Mesures avec un limiteur simulé de 100 kVA.....	35
3.6 AJOUTS FUTURS AU CIRCUIT D'ESSAI	40
4. ESSAI DE PROTOTYPES DE LIMITEUR DE COURANT.....	42
4.1 RÉSULTAT DES ESSAIS DU PROTOTYPE HQ#6.....	42
4.2 RÉSULTAT DES ESSAIS DU PROTOTYPE HQ#10.....	45
4.3 EFFETS DE L'ALTERNATEUR SUR LES RÉSULTATS D'ESSAIS.....	48
4.4 AMÉLIORATION DES TECHNIQUES D'ESSAI.....	51
CONCLUSION.....	52
RÉFÉRENCES.....	53

LISTE DES TABLEAUX

<u>TABLEAU 1.1:</u> EXIGENCES ENTRE CLIENTS ET FOURNISSEURS D'ÉLECTRICITÉ.....	4
<u>TABLEAU 1.2:</u> LES CLASSES DE TENSIONS USUELLES.	4
<u>TABLEAU 2.1:</u> LISTE DE PARAMÈTRES ET INDICES DE PERFORMANCE.	22
<u>TABLEAU 3.1:</u> PARAMÈTRES PRÉ-DÉTERMINÉS DE L'ESSAI À 100 KW.	36
<u>TABLEAU 3.2:</u> INFLUENCE DES SOURCES SUR LES PARAMÈTRES D'UN ESSAI.	40
<u>TABLEAU 4.1:</u> RÉSULTATS DES ESSAIS DE HQ#6 ET DE HQ#10.	48

LISTE DES FIGURES

<u>FIGURE 1.1:</u> STRUCTURE GÉNÉRALE D'UN RÉSEAU D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.	3
<u>FIGURE 1.2:</u> CIRCUIT ÉQUIVALENT D'UN DÉFAUT AVEC RÉSISTANCE D'ARC.	6
<u>FIGURE 1.3:</u> COURANT DE DÉFAUT 100% ASYMÉTRIQUE À $\Psi = 0$ ET $X/R=10$	7
<u>FIGURE 2.1:</u> VARIATION DE R/R_0 DU PT ET DU HG AVEC LA TEMPÉRATURE	13
<u>FIGURE 2.2:</u> ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE CRITIQUE DES SUPRACONDUCTEURS.....	16
<u>FIGURE 2.3:</u> DÉPENDENCE DE J_c AVEC LA TEMPÉRATURE ET LE CHAMP MAGNÉTIQUE.....	17
<u>FIGURE 2.4:</u> PASSAGE À L'ÉTAT RÉSISTIF D'UN FIL SUPRACONDUCTEUR.....	18
<u>FIGURE 2.5:</u> CONFIGURATION "NOYAU DE FER BLINDÉ" D'UN LIMITEUR SUPRACONDUCTEUR.....	19
<u>FIGURE 2.6:</u> MODÈLE SIMPLIFIÉ DE LA CONFIGURATION NFB.....	20
<u>FIGURE 2.7:</u> RÉGIME RÉSISTIF ET RÉGIME INDUCTIF D'UN LIMITEUR NFB.	21
<u>FIGURE 3.1:</u> SCHÉMA DU CIRCUIT D'ESSAI AVEC SON APPAREILLAGE DE PUISSANCE.	23
<u>FIGURE 3.2:</u> SYNOPTIQUE DU GROUPE MOTEUR-GÉNÉRATEUR ET DE L'INSTALLATION ÉLECTRIQUE.....	24
<u>FIGURE 3.3:</u> CROQUIS DE LA CHARGE 100 kW/600 V.....	26
<u>FIGURE 3.4:</u> SCHÉMA ÉLECTRIQUE DES ALIMENTATIONS DE COMMANDE DES CONTACTEURS.	28
<u>FIGURE 3.5:</u> SYNOPTIQUE DES SYSTÈMES D'ACQUISITION ET DE CONTRÔLE.....	31
<u>FIGURE 3.6:</u> DÉFINITION DES PÉRIODES ET INSTANTS D'UNE SÉQUENCE D'ESSAI.....	34
<u>FIGURE 3.7:</u> SIMULATION D'UN LIMITEUR DE COURANT AVEC LA CHARGE.....	35
<u>FIGURE 3.8:</u> ESSAI À 100 kW ALIMENTÉ D'ABORD PAR L'ALTERNATEUR PUIS PAR LE RÉSEAU.....	37
<u>FIGURE 3.9:</u> COMPARAISON DE LA TENSION DES SOURCES.....	38
<u>FIGURE 3.10:</u> RÉACTIONS DES SOURCES DE TENSION À L'ENCLenchement DU DÉFAUT.....	38
<u>FIGURE 3.11:</u> CONSÉQUENCES D'UN ESSAI À 100 kVA SUR LE RÉSEAU.....	39

<u>FIGURE 4.1:</u> ESSAI DU PROTOTYPE HQ#6 À $V_{NOM}=300$ V ET $I_{NOM}=95$ A.	42
<u>FIGURE 4.2:</u> ESSAI DU PROTOTYPE HQ#6 À $V_{NOM}=450$ V ET $I_{NOM}=95$ A.	43
<u>FIGURE 4.3:</u> ESSAI DU PROTOTYPE HQ#6 À $V_{NOM}=490$ V ET $I_{NOM}=95$ A.	43
<u>FIGURE 4.4:</u> ESSAI À 100 KVA ET 600 V DU PROTOTYPE HQ#10.	45
<u>FIGURE 4.5:</u> PUISSANCE ET ÉNERGIE DISSIPÉE DANS L'ESSAI À 100 KVA DE HQ#10.....	46
<u>FIGURE 4.6:</u> ENERGIE ET I^2t DE L'ESSAI À 100 KVA DE HQ#10.	47
<u>FIGURE 4.7:</u> ÉCHANTILLON DE LA TENSION ALTERNATEUR DURANT UN DÉFAUT.....	49
<u>FIGURE 4.8:</u> RECONSTITUTION DU SIGNAL PAR LA SOMME PARTIELLE DE SES HARMONIQUES.....	50

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

- Ag/Bi-2223: Composé céramique supraconducteur $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ gainé d'argent (HTS).
- ASCII: American Standard Code for Information Interchange. Représentation de caractères alphanumériques à l'aide d'un code de 7 ou 8 bits.
- BCS: Théorie de la supraconduction établie en 1957 par trois scientifiques américains Bardeen, Cooper et Schrieffer qui l'on nommée d'après leur initiale.
- Bi-2212: Composé céramique supraconducteur $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ (HTS)
- B.T.: Basse tension. Gamme de tension de 120 V à 600 V
- C.D.T.: Centre de Développement Technologique. Service de l'École Polytechnique fondé en 1972, facilitant les relations de l'École avec l'industrie en R et D.
- DELS: Diodes électro-luminescentes.
- EPRI: Electric Power Research Institute. Consortium américain de recherche et développement du secteur de la puissance électrique créé en 1973.
- f.é.m.: Force électro-motrice.
- FFT: Fast Fourier Transform. Algorithme de calcul des harmoniques optimisé pour des cas particuliers d'un nombre d'échantillons (ex: 2^N échantillons).
- GPIB: General Purpose Interface Bus. Interface parallèle de communication informatique inventée par Hewlett-Packard et normalisée en 1975.
- GS: Alternateur synchrone.
- H_{c2} : Excitation magnétique critique (A/m).
- H.T.: Haute tension. Gamme de tension de 115 kV à 230 kV
- HTS: High Temperature Superconductor. Classe des supraconducteurs de type céramique dont la température critique est supérieure à 30 K.
- IBM: Marque de commerce déposé de International Business Machines Corporation.

I_c :	Courant critique d'un supraconducteur dont la géométrie est définie
IREQ:	Institut de Recherche en Électricité du Québec.
J_c :	Densité critique de courant (A/m^2 ou kA/cm^2).
LBCO	Famille supraconductrice dont le composé est $La_1Ba_2Cu_3O_7$.
LTS:	Low Temperature Superconductor. Classe de supraconducteurs de type métallique dont la température critique est inférieure à 25K
M.A.L.T.:	Mise à la terre.
MAS:	Moteur asynchrone. Moteur à induction à cage d'écureuil ou à rotor bobiné.
MG:	Groupe tournant Moteur-Générateur.
M.T.:	Moyenne tension. Gamme de tension de 2.4 kV à 69 kV
Nb_3Sn :	Niobiure d'étain. Alliage métallique supraconducteur (LTS).
$NbTi$:	Niobiure de titane. Alliage métallique supraconducteur (LTS).
NEMA:	National Electrical Manufacturers Association. Organisme nord-américain de normalisation du secteur de l'industrie électrique fondé dans les années 20.
NFB:	Noyau de Fer Blindé. Concept particulier d'un limiteur de courant de défaut basé sur l'expulsion du flux magnétique des matériaux supraconducteurs.
OPIT:	Oxide Powder In Tube. Procédé de fabrication de fil HTS consistant à étirer un tube rempli d'un précurseur céramique pour le mettre en forme de fil avant de lui faire subir une série de traitement thermomécanique.
PC:	Personnal Computer. Fait référence à un micro-ordinateur personnel compatible aux standards d'IBM.
p.u.:	Par unité. S'utilise dans le calcul normalisé, 100% représentant 1 p.u.
R et D:	Recherche et développement.
SMES:	Superconducting Magnetic Energy Storage. Système de stockage d'énergie sous forme magnétique dans une inductance supraconductrice: $W=1/2 LI^2$

SQUID:	Superconducting Quantum Interference Device. Magnétomètre ultra-sensible basé sur l'effet des quanta de flux dans un dispositif supraconducteur.
T_c :	Température critique (K).
T.H.T.:	Très haute tension. Gamme de tension de 345 kV à 765 kV
TTL:	Transistor-Transistor Logic. Technologie des circuits intégrés n'utilisant que des transistors bipolaires et dont les niveaux de tension sont entre 0 et 5 V.
Type K:	Thermocouple réalisé par une jonction cuivre-constantin.
VI:	Courbe de tension en fonction du courant.
WBCT:	Wide Band Current Transformer. Transformateur de mesure dont le circuit magnétique est spécialement conçu pour travailler en haute fréquence.
YBCO:	famille supraconductrice dont le composé est $Y_1Ba_2Cu_3O_7$.
ZFCT:	Zero Flux Current Transformer. Technologie de mesure de courant basée sur l'asservissement à flux magnétique nul dans un transformateur de courant.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I: ARTICLE SUR LE TEST ET LA MODÉLISATION DU PROTOTYPE HQ#6.....	55
ANNEXE II: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DU GROUPE MOTEUR-ALTERNATEUR.....	60
ANNEXE III: CARACTÉRISTIQUE DE L'ALTERNATEUR EN COURT-CIRCUIT	63
ANNEXE IV: FICHE D'UTILISATION DU CIRCUIT D'ESSAI.....	65
ANNEXE V: ANALYSE HARMONIQUE DE LA TENSION ALTERNATEUR AVEC MATLAB	70

AVANT-PROPOS

Depuis trois ans, Hydro-Québec et la société Siemens travaillent en collaboration sur la mise au point et la commercialisation de limiteurs de courant supraconducteur pour les années 2000. Dans cette entente de collaboration, l'équipe de recherche en supraconductivité d'Hydro-Québec étudie une configuration inductive de limiteur de courant supraconducteur alors que Siemens s'intéresse à une conception résistive. Au terme de la phase I du projet, l'évaluation des performances de petits prototypes des deux groupes permettra de choisir les matériaux supraconducteurs appropriés et une configuration viable. La phase suivante implique la mise au point d'un prototype pleine échelle destiné aux réseaux de distribution à 25 kV.

Mes travaux effectués à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) concernant le test de prototypes sont une partie intégrante de la phase I du projet limiteur de courant. Bien que mon séjour se soit déroulé parmi l'équipe de supraconductivité de l'IREQ, mes activités relèvent plutôt de l'électrotechnique appliquée que de la physique des supraconducteurs. En effet, mon sujet de recherche porte sur la conception et la réalisation d'un circuit d'essai de limiteurs de courant de défaut. Un autre aspect de mon travail concerne les mesures électriques de plusieurs prototypes inductifs de limiteur supraconducteur de courant.

INTRODUCTION

La croissance de la consommation d'énergie électrique pousse les sociétés d'électricité à ajuster la capacité de génération et de transport de leurs réseaux. Néanmoins, les transformations majeures portent sur le réseau de distribution dont la complexité et les interconnexions s'étendent avec l'augmentation de la puissance installée. Ces changements conduisent à une baisse d'impédance du réseau dont le résultat se traduit par un niveau accru des courants de court-circuit. Le risque de blessure et les perturbations associés à des courts-circuits élevés justifient le besoin de limiter l'amplitude de ces courants. Depuis plus de vingt ans, des recherches faisant appel à diverses techniques, visent à concevoir et à mettre au point un limiteur de courant compétitif pouvant s'intégrer facilement au réseau de distribution.

La propriété intrinsèque de certains matériaux de passer rapidement de l'état supraconducteur vers l'état résistif normal en fonction du courant, les prédispose à des conceptions passives et sans pièces mobiles d'appareil limiteur de courant. En revanche, la plupart de ces matériaux ne fonctionnent qu'à des niveaux de froid proche du zéro absolu. Les coûts de la cryogénie des basses températures et l'usage de l'hélium liquide (4.2K), ont empêché l'essor des supraconducteurs. La découverte en 1987 de la supraconductivité à haute température dans certaines céramiques refroidies à l'azote liquide (77K), donne une seconde jeunesse à la supraconductivité. Dès lors, une multitude d'innovations électrotechniques sont techniquement envisageables. Dans ce contexte, la limitation des courants de défaut promet d'être l'une des premières applications concrètes de la technologie des supraconducteurs à haute température.

Dans l'objectif d'améliorer la sécurité du personnel et la qualité de l'onde, Hydro-Québec s'est engagée en 1991 dans un projet de R et D d'un limiteur supraconducteur de courant de défaut. Ce projet se poursuit depuis 1994 en partenariat avec la société allemande Siemens AG qui s'intéresse aux films d'YBCO tandis qu'à l'IREQ nous étudions les pièces massives de Bi-2212. L'évaluation de cette nouvelle technologie nous a imposé la fabrication d'une série de prototypes ainsi que l'aménagement d'une zone d'essai pour les tester.

Mon projet comporte la mise au point d'un nouveau circuit d'essai et les essais de prototypes de limiteur de courant. La capacité nominale du circuit de 100 kVA à 600 V et les régimes transitoires de surcharge autour de 1 MVA obligent à choisir avec attention l'appareillage de puissance. Par ailleurs, l'aire des essais située dans un laboratoire de l'IREQ doit respecter la sécurité des personnes. Les solutions techniques adoptées dans les protections et l'instrumentation du circuit d'essai constituent l'originalité de mon travail.

Ce mémoire résume en quatre chapitres l'ensemble de ma maîtrise effectuée à l'IREQ entre mai 1995 et avril 1997. Le premier chapitre couvre la problématique des courants de défaut dans les réseaux de distribution électrique. On y parle de leurs aspects, de leurs effets, des techniques classiques pour s'en protéger et des avantages à les limiter. Le deuxième chapitre débute par un aperçu de la supraconductivité et expose ensuite quelques caractéristiques des limiteurs de courant de défaut développés par Hydro-Québec. Le chapitre 3 commence par la description des sous-ensembles du circuit d'essai en expliquant leurs fonctions; il se termine par la mise en service et la validation des organes du circuit, notamment la source. Les comportements de deux prototypes en essai sont commentés au dernier chapitre.

1. LES COURANTS DE DÉFAUT EN DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE

Ce chapitre aborde la problématique des courants de défaut dans les réseaux électriques de distribution. La limitation de courant y est introduite comme une solution intéressante aux besoins en matière de qualité de l'onde, de sécurité des personnes et d'extension de la durée de vie des équipements.

1.1 Organisation d'un réseau de transport d'énergie électrique

Un réseau d'énergie électrique se divise en quatre parties principales: la production d'énergie électrique, son transport, sa distribution et son utilisation [1]. Les trois premières parties relèvent de la société de service électrique responsable de l'exploitation du réseau alors que l'utilisation regroupe l'ensemble des clients desservis par ce même réseau. La figure 1.1 créée d'après [1] représente la structure générale d'un réseau. Les grands consommateurs industriels sont alimentés en moyenne tension alors que les résidences et les petites industries reçoivent de la basse tension.

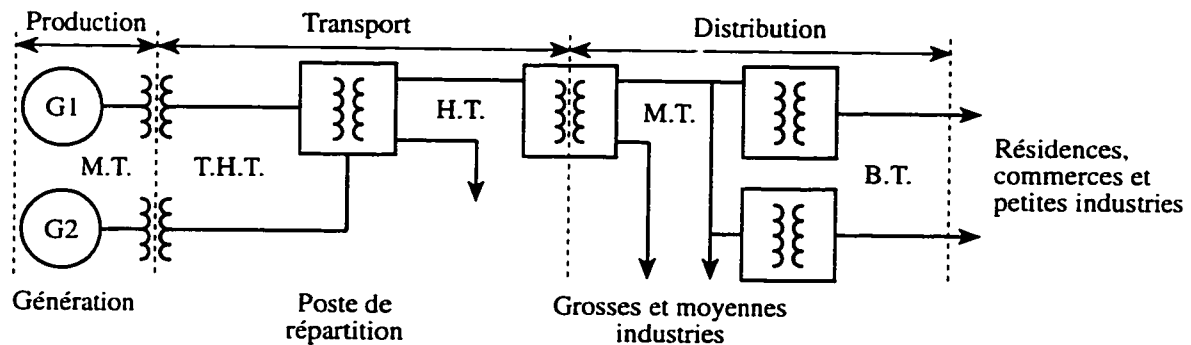


Figure 1.1: Structure générale d'un réseau d'énergie électrique.

Le réseau doit fournir la puissance à laquelle le client a souscrit selon les ententes plus ou moins contractuelles inspirées de [1] et présentées au tableau 1.1.

Tableau 1.1: Exigences entre clients et fournisseurs d'électricité.

Obligations du fournisseur d'électricité	Obligations du client
Fournir la puissance demandée à ses clients	
Assurer du mieux que possible la continuité de service et minimiser la durée des coupures	Ne pas appeler trop d'énergie réactive sous peine de payer des pénalités (clients industriels)
Tension nominale fixe avec des variations inférieures à $\pm 10\%$	Ne pas injecter trop d'harmoniques sur le réseau (charges non-linéaires de clients industriels)
Fréquence nominale stable dans un intervalle de tolérance de $\pm 0,1$ Hz	Respecter le code et les normes en vigueur des installations électriques
Maintenir la sécurité des personnes par le respect de normes	Maintenir la sécurité des personnes par le respect de normes
Protéger l'environnement au mieux de ses capacités	Protéger l'environnement au mieux de ses capacités
Assurer la facturation de l'énergie consommée à un coût convenable	Honorer ses factures dans les délais requis

L'énergie électrique est acheminée des lieux de production jusqu'aux usagers en empruntant des lignes exploitées à diverses classes de tension. Les classes de tensions usuelles en Amérique du Nord sont énumérées au tableau 1.2 d'après [1].

Tableau 1.2: Les classes de tensions usuelles.

Classe de tension	Gamme des tensions nominales
Très haute tension (T.H.T.)	De 345 kV à 765 kV
Haute tension (H.T.)	De 115 kV à 230 kV
Moyenne tension (M.T.)	De 2,4 kV à 69 kV
Basse tension (B.T.)	De 120 V à 600 V

La génération se fait en M.T., typiquement à 13,8 kV. Un premier niveau de transformation élève la tension pour le transport sur les grandes distances afin de réduire les pertes joules dans les lignes. Le transport se fait en T.H.T. et H.T. jusqu'à proximité des zones de consommation où des postes de transformation distribuent l'électricité aux usagers en moyenne et basse tension. Le réseau possède une impédance de source équivalente qui établit

le courant de défaut maximal disponible en un point, considérant le cas critique d'un défaut franc. Cette impédance de source diminue avec la tension d'exploitation. En effet, pour un écoulement à puissance constante, le courant nominal varie en proportion inverse de la tension. L'impédance du système exprimée en valeur relative (p.u.) augmente dans le sens de l'écoulement de puissance après chaque transformateur ou section de ligne. Cependant l'impédance de base définie à 1 p.u voit sa valeur absolue (en ohms) diminuer avec le carré de la tension au point considéré.

1.2 Caractéristiques des défauts en distribution

Les réseaux électriques modernes offrent un niveau d'isolation suffisant pour supporter la tension d'exploitation ainsi que les surtensions de manoeuvre. Néanmoins, il arrive que des conditions atmosphériques (foudre, verglas, vent) ou une défaillance d'équipement soient à l'origine d'un défaut. Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, le réseau de distribution en moyenne et basse tension présente une faible impédance équivalente de source, si bien qu'il est sujet à un niveau particulièrement élevé de court-circuit. Une surintensité de courant de l'ordre de 10 à 50 p.u. provoque des contraintes mécaniques et thermiques importantes sur les équipements dont la survie repose sur une coupure rapide du courant.

1.2.1 Aspect typique d'un courant de défaut

Un court-circuit survient en un lieu précis du réseau lorsqu'il y a dégradation du milieu isolant entre deux points de tension différente. Il en résulte un fort courant circulant entre la source et l'endroit du court-circuit dont l'intensité dépend de la tension de source et des impédances traversées par le courant. Un circuit équivalent présenté à la figure 1.2 schématise les paramètres de source, de ligne et d'arc. Dans ce circuit, L cumule la réactance de source avec celle de la section de ligne en défaut. Le comportement de l'arc est représenté par une résistance constante.

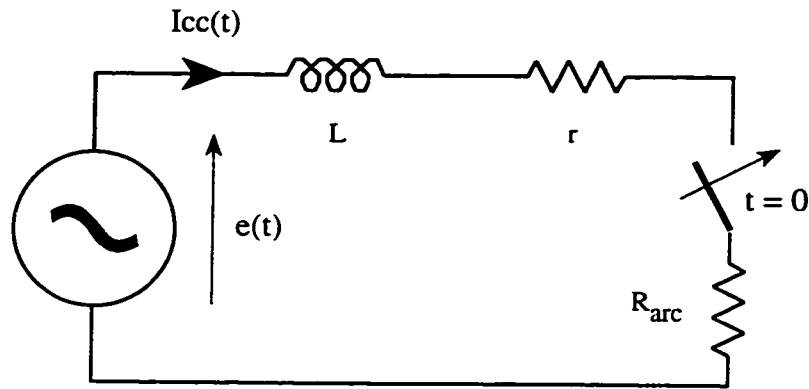


Figure 1.2: Circuit équivalent d'un défaut avec résistance d'arc.

L'inductance série et l'angle Ψ d'enclenchement du défaut sur l'onde sinusoïdale de tension sont responsables de l'asymétrie du courant. La loi des mailles appliquée au circuit équivalent donne une équation différentielle du premier ordre dont la résolution conduit à l'expression temporelle du courant selon les relations suivantes:

$I_{cc}(t) = I_{ac}(t) + I_{dc}(t)$	courant de défaut asymétrique
$I_{ac}(t) = \frac{V}{Z} [\sin(\omega t + \psi - \theta)]$	composante alternative permanente
$I_{dc}(t) = \frac{V}{Z} \left[\sin(\psi - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$	composante transitoire
$e(t) = V \sin(\omega t + \psi)$	ψ = angle d'enclenchement du défaut sur l'onde sinusoïdale de tension
$R = r + R_{arc}$	résistance du circuit
$X = L\omega$	réactance du circuit
$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	impédance de limitation
$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R}$	angle de déphasage du courant

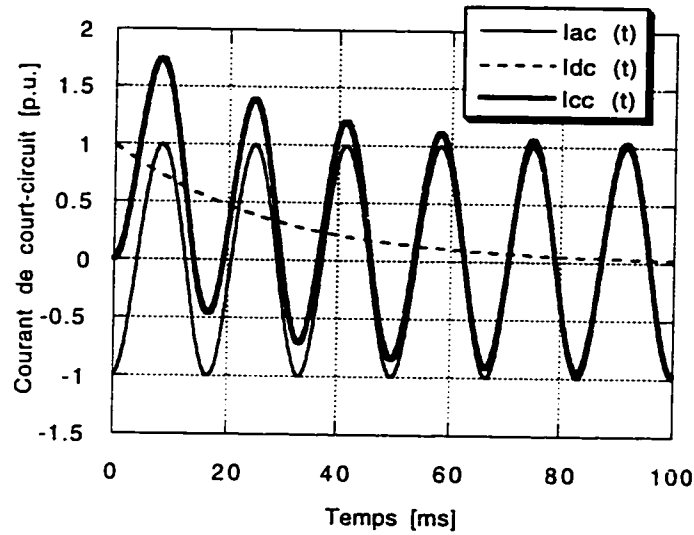


Figure 1.3: Courant de défaut 100% asymétrique à $\Psi = 0$ et $X/R=10$.

Le cas d'asymétrie maximale qui survient lorsque $\Psi = 0$ est montré à la figure 1.3. Un angle de défaut $\Psi=\theta$ produira un courant de court-circuit parfaitement symétrique, θ étant l'angle de déphasage entre la tension et le courant (à 60 Hz) en régime établi. Dans un circuit purement inductif $\theta=90^\circ$. Les effets mécaniques du court-circuit se manifestent par des forces électromagnétiques entre conducteurs selon l'équation suivante:

$$F = \mu_0 \frac{I_1 I_2 l}{2\pi d} \quad \text{force [N]}$$

I_1, I_2 : courants dans les conducteurs [A]
 l, d : longueur et écartement des conducteurs [m]
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ perméabilité du vide [H/m]

Des courants circulant dans le même sens attirent les conducteurs alors que des courants opposés les repoussent. Dans un transformateur, les spires des enroulements (solénoïdes) sont en compression, alors que la bobine subit un effort radial de dilatation.

1.2.2 Effets thermiques d'un défaut

Le court-circuit se produit à $t=0$ et se maintient pendant la durée t_{arc} jusqu'à son élimination par un système de protection qui n'est pas représenté dans le circuit de la figure 1.2. La résistance d'arc étant généralement faible devant la réactance du circuit, l'amplitude de la surintensité de courant est surtout dictée par l'impédance de la ligne et de la source. Toutefois, le passage du courant libère de l'énergie sous forme de chaleur, seulement à travers les résistances du circuit selon les relations suivantes:

$W_S = W_R + W_A$	bilan énergétique du court-circuit
$W_S = \int_0^{t_{ARC}} e(t) \times i(t) dt$	énergie totale fournie par la source
$W_R = r \int_0^{t_{ARC}} i^2(t) dt$	énergie dissipée dans les composants du circuit
$W_A = R_{arc} \int_0^{t_{ARC}} i^2(t) dt$	énergie dissipée dans l'arc du court-circuit

Une fraction de cette puissance se dissipe le long des conducteurs et dans l'appareillage (W_R) alors qu'une bonne partie se dégage au point de défaut (W_A). En considérant les densités volumique d'énergie en présence, les conducteurs s'échauffent légèrement alors que les endroits où se concentrent les résistances du circuit (arc et appareillage) subissent une forte dissipation thermique. On exprime l'effet thermique d'un défaut par sa valeur caractéristique I^2t définie par l'intégrale:

$$I^2t = \int_0^t i^2(t) dt$$

La valeur indique l'énergie dissipée dans le circuit pour chaque ohm de résistance compris entre la source et le point de défaut.

1.3 Protection contre les surintensités

Le but de la protection est de minimiser localement les dommages que le courant de défaut peut causer et de réduire globalement ses conséquences (chute de tension, distorsion harmonique, stabilité) sur le reste du réseau [2]. Le dispositif de protection isole rapidement la section de réseau défectueuse lorsque survient un court-circuit. Pour cela, il comprend trois fonctions essentielles: la détection de la surintensité, la temporisation et la coupure du défaut. Un système élaboré comprend une mesure du courant, une courbe de réponse spécifique programmée dans un relais de protection et un disjoncteur assurant la coupure du courant de défaut. La coordination des réglages de seuil et de temps de réponse de protections en cascade garantit la sélectivité du système qui ne devra isoler que la zone concernée par le problème évitant ainsi une interruption inutile de service à d'autres clients.

La durée d'un défaut est constitué des temps de détection, de signalisation et de coupure. La détection/signalisation par transformateur de courant et relais prend au moins 0,5 cycle à détecter le défaut. Les disjoncteurs modernes à gaz SF_6 requièrent pas moins de 2,5 cycles pour ouvrir leurs contacts et couper leurs arcs internes. En conséquence, la durée minimale d'un défaut sur une ligne de distribution est d'au moins 3 cycles pendant lesquels le plein courant de court-circuit s'écoule [3].

Un simple fusible intègre avec moins de souplesse les trois fonctions élémentaires d'une protection par disjoncteur. La fusion de l'élément fusible débute lorsque le I^2t du courant excède la caractéristique temps-courant admissible du fusible. Les fusibles à expulsion sont peu coûteux et largement utilisés sur les connexions primaires des transformateurs 14,4 kV/240 V installés sur poteaux. L'emploi de ces fusibles dont le temps de coupure est long requiert une temporisation encore plus longue de la protection amont par disjoncteur puisque il est souhaitable que le disjoncteur ne réagisse pas avant le fusible (sélectivité).

L'usage répandu sur plusieurs décennies de fusibles et de relais de protection électromécaniques a favorisé l'idée qu'un courant de défaut élevé est préférable puisqu'il permet une réaction plus rapide des systèmes de protection pour une même valeur de I^2t . Aujourd'hui, grâce à l'intégration de micro-processeurs, les relais numériques apportent une grande souplesse de réglages même à faible surintensité de courant.

Les concepts récents de sécurité des personnes, de longévité des équipements et de qualité de l'onde visent plutôt à réduire l'amplitude du courant de court-circuit. Un arc à l'air libre de plusieurs kiloampères peut occasionner des brûlures et des éblouissements à des personnes situées à proximité. L'onde de choc produite par un arc accidentel confiné dans un équipement (sectionneur, disjoncteur, jeu de barres omnibus...) est susceptible de le faire exploser. Lorsque l'équipement utilise de l'huile comme diélectrique (transformateur) l'arc entraîne la formation de méthane (CH_4), qui se décompose en acétylène (C_2H_2) et en hydrogène (H_2) qui s'enflamment au contact de l'air. De plus, une forte surintensité provoque un choc sur le réseau qui entraîne des perturbations de tension voire de l'instabilité. Enfin, les efforts mécaniques et l'échauffement d'un équipements résultant d'un court-circuit pour lequel la protection primaire n'a pas fonctionné, se solde bien souvent par sa destruction.

1.4 Limitation du courant de défaut

L'appareillage d'une ligne dotée d'une protection adéquate est conçu pour soutenir, sans bris ou usure excessive, les effets mécaniques et thermiques d'un court-circuit. En particulier, l'organe de coupure (disjoncteur ou fusible) doit posséder un pouvoir d'interruption de courant supérieur au niveau maximal disponible de défaut. La croissance de la demande, l'expansion et l'interconnexion des réseaux de distribution se traduisent par une baisse d'impédance équivalente de source et donc par une augmentation du niveau de courant de défaut disponible [4].

Dans certains réseaux de distribution, il arrive que le niveau disponible de court-circuit atteigne 30 kA et dépasse le pouvoir de coupure maximal de 10 kA des disjoncteurs existants. Dans ces conditions, une réactance de limitation est installée sur les phases de chaque ligne afin de réduire le niveau de court-circuit en dessous de 10 kA. Cette augmentation d'impédance se fait au détriment de la qualité de l'onde puisqu'elle entraîne des baisses de tension importantes, produit plus de distorsion harmonique et diminue la stabilité du réseau de distribution [4].

Ces réactances utiles seulement lors de défauts sévères, sont un fardeau à régime nominal. Elles absorbent de la puissance (active et réactive) et introduisent des fluctuations de tension lors de manoeuvres sur le réseau et de variations rapides de la charge.

1.5 Performances recherchées d'un limiteur de courant

Une approche corrective aux inconvénients des réactances de limitation consiste à les remplacer par des éléments non-linéaires dont l'impédance se développe au-delà d'un certain seuil de courant. L'appareil idéal devra être transparent pour la ligne fonctionnant à régime nominal tout en limitant efficacement l'amplitude des éventuels courants de courts-circuits. Cette transparence en condition normale, que doit respecter tout système de protection, implique une faible consommation de puissance et une chute de tension réduite. Une étude faite par Westinghouse en 1989 auprès de 27 sociétés d'électricité américaines [5] indique qu'il existe un besoin d'appareils de limitation de courant. Une majorité des sociétés seraient intéressées par un appareil fonctionnant sur des lignes de distribution d'environ 15 kV/600 A, ramenant leur courant de défaut supérieur à 20 kA à moins de 10 kA. Par ailleurs, l'appareil devrait opérer 50 fois selon une séquence d'ouverture triple (OFOFO) avant de requérir une intervention de maintenance.

2. CARACTÉRISTIQUES D'UN LIMITEUR SUPRACONDUCTEUR DE COURANT

Ce chapitre expose quelques propriétés uniques des matériaux supraconducteurs sur lesquelles reposent différentes conceptions de limiteurs de courant. Nous aborderons une configuration particulière de limiteur de courant en développement à l'IREQ depuis cinq ans.

2.1 Les supraconducteurs et la limitation de courant

Cette section introduit la supraconductivité par un bref historique puis décrit un modèle classique du phénomène de supraconduction pour finalement aborder quelques propriétés des supraconducteurs qui sont mises à profit dans la limitation de courant.

2.1.1 Historique

Nous devons la découverte de la supraconductivité au physicien hollandais Kamerlingh Onnes qui fût le premier scientifique à réussir la liquéfaction de l'hélium en 1909. Dès lors, l'évaporation de hélium liquide ouvre la voie des recherches aux températures proches du zéro absolu. Quatre ans plus tard, Onnes met en évidence la perte brusque de résistivité du mercure à 4,15 K comme le montre la figure 2.1 basée sur [6] d'après [7]. Il nomme lui-même "superconductivity" cette transition d'état de la matière qui lui vaut le prix Nobel de physique en 1913. Par la suite, de nombreux métaux et alliages métalliques furent identifiés comme supraconducteurs à des températures inférieures à 20 K. Excepté l'imagerie médicale (IRM) que l'on doit aux récents progrès des fils et aimants supraconducteurs, l'environnement cryogénique complexe et cher a restreint les retombées de la supraconductivité aux instruments sensibles de laboratoire et aux recherches impliquant des champs magnétiques intenses.

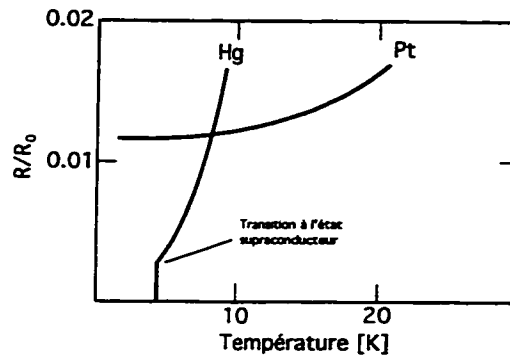


Figure 2.1: Variation de R/R_0 du Pt et du Hg avec la température¹

Il faut attendre 1986 pour que deux chercheurs d'IBM, Alex Müller et Georg Bednorz, décroche le prix Nobel pour la découverte des composés céramiques supraconducteurs à 32 K de la famille du LBCO. Peu après, une équipe de l'université de Houston au Texas, substitue l'yttrium au lanthane et obtient un supraconducteur à 92 K, de la famille de l'YBCO. Cette découverte révolutionne le domaine scientifique, puisque dorénavant l'azote liquide à 77K, disponible et bon marché, succède avantageusement à l'hélium pour réfrigérer ces nouveaux matériaux appelés supraconducteurs à haute température (HTS) pour les distinguer des supraconducteurs à basse température (LTS).

Grâce à sa nouvelle jeunesse, la supraconductivité est l'objet de recherches actives qui s'intéressent à la fois au matériau, mais aussi à ses applications jusqu'alors impraticables étant donné les coûts liés à l'exploitation de l'hélium liquide. Simultanément, l'avancée technique des cryoréfrigérateurs a atteint un degré qui autorise aujourd'hui le refroidissement par conduction, supprimant dans certains cas le besoin d'un réfrigérant liquide. Cependant les propriétés intrinsèques d'un supraconducteur (température, densité de courant et champ magnétique) ne déterminent pas à elles seules la faisabilité d'applications commerciales. Un

¹ R_0 est la résistance à 0°C.

bon nombre de réalisations électrotechniques reposent sur la fabrication de grande longueur (km) de fils aux caractéristiques homogènes que l'on puisse manipuler et bobiner comme du vulgaire fil de cuivre émaillé. Si l'on maîtrise plusieurs procédés de fabrication de fils LTS basés sur les alliages métalliques NbTi et Nb_3Sn , les méthodes de production des fils HTS quant à elles, doivent surmonter les difficultés inhérentes aux céramiques telles que la fragilité, leur nature hétérogène et la nécessité d'un traitement thermomécanique complexe.

Dix ans seulement après sa synthèse, la céramique $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O$ est mise en forme d'un ruban multi-filamentaire stabilisé dans une matrice d'argent par un procédé d'étirage (OPIT), comparable à la fabrication des fibres optiques. Les récentes améliorations des propriétés des fils Ag/Bi-2223 et les dernières techniques industrielles d'élaboration confirment le potentiel technologique de la supraconductivité à haute température. À moyen terme, l'intégration des supraconducteurs au domaine de la puissance électrique devrait déboucher sur des conceptions à rendement accru de transformateurs, moteurs et générateurs ou sur de tout nouveaux appareils tels que les limiteurs de courant, les systèmes magnétiques de stockage d'énergie (SMES)... etc.

2.1.2 Explication physique de la supraconduction

Une théorie satisfaisante de la supraconductivité à basse température ($<30K$) fut avancée en 1957 par les Américains Bardeen, Cooper et Schrieffer. Cette théorie appelée BCS repose sur l'interaction électron-phonon régie par la mécanique quantique.

À température ambiante, sous l'effet d'un champ électrique, les électrons libres d'un conducteur classique se déplacent pour donner un courant. Ces électrons interagissent entre eux ainsi qu'avec le réseau cristallin du conducteur, si bien que leurs trajectoires chaotiques sont indépendantes les unes des autres à l'exception de la tendance macroscopique générale au

déplacement parallèle au champ électrique. Ce comportement électronique, à l'origine de la résistance électrique, produit de la chaleur: c'est l'effet joule.

Dans certains matériaux il se produit une interaction entre les électrons et le réseau atomique lorsque la température est suffisamment basse. Les électrons ne se comportent plus comme des corpuscules isolés mais s'associent en binômes dits "paires de Cooper". Ces paires, constituées d'un électron de spin² +1/2 et d'un autre de spin -1/2, forment des entités de spin entier et nul. De telles entités appartiennent à la famille des bosons alors que les corpuscules de spin fractionnaire, comme les électrons "normaux", se classifient parmi les fermions. Selon le principe d'exclusion de Pauli, les bosons peuvent être dans le même état quantique et donc appartenir à la même fonction d'onde. C'est ce qui se passe quand on refroidit un supraconducteur en dessous du seuil d'agitation thermique dont l'énergie est inférieure à celle de liaison des paires. Le courant devient alors une onde électronique se propageant sans dégagement de chaleur: c'est l'état supraconducteur.

2.1.3 Température d'opération

Comme nous l'avons déjà vu, la principale limitation des supraconducteurs est leur température d'opération qui doit nécessairement se situer au-dessous de leur température de transition entre l'état résistif à l'état supraconducteur. La figure 2.2 identifie pour chaque année de découverte, le supraconducteur possédant la température critique la plus haute. Les supraconducteurs métalliques présentent des T_c qui plafonnent à 23K. C'est pourquoi les physiciens se sont orientés vers les conducteurs synthétiques, notamment les céramiques. Les supraconducteurs à haute température découverts depuis 1986, appartiennent tous à la famille des pérovskites³.

²Moment cinétique d'une particule élémentaire.

³Céramiques dont la structure est basée sur de multiples couches d'oxyde de cuivre.

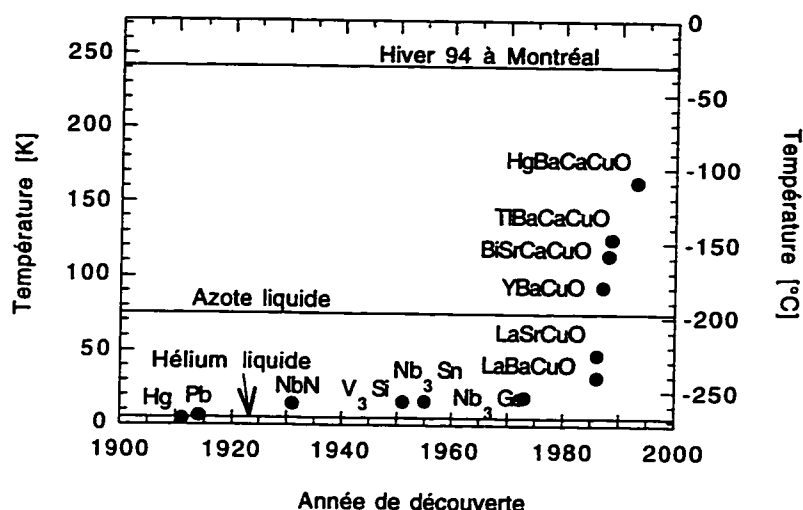


Figure 2.2: Évolution de la température critique des supraconducteurs.

2.1.4 Surfaces critiques d'un supraconducteur à haute température

La principale qualité d'un supraconducteur réside dans sa capacité à transporter un courant sans pertes (courant continu) ou presque (courant alternatif). Cependant, bien que l'effet joule soit inexistant, on ne peut pas le soumettre à un courant infini. Au-delà d'une certaine densité critique de courant (J_c), le supraconducteur bascule vers l'état résistif et ceci, malgré $T < T_c$. Il existe un troisième seuil à la supraconduction sous forme d'une excitation magnétique critique H_{c2} . Lorsqu'une de ces trois grandeurs dépasse son seuil critique, le supraconducteur devient résistif. La figure 2.3 basée sur [8] présente la surface critique $J_c = f(H, T)$ de deux supraconducteurs classiques le NbTi et le Ag/Bi-2223 dont les températures critiques sont respectivement 9,3 K et 115 K. À 77 K la caractéristique $J_c = f(H)$ du BSCCO dénote une chute abrupte de J_c en présence d'un champ magnétique. Cette contrainte bannit l'utilisation de ces fils à 77K des applications où le champ dépasse 0.1 T. Toutefois, ils offrent de très bonnes caractéristiques autour de 30 K avec un J_c de l'ordre de 50 kA/cm² dans la gamme de champ magnétique comprise entre 0 et 5 T.

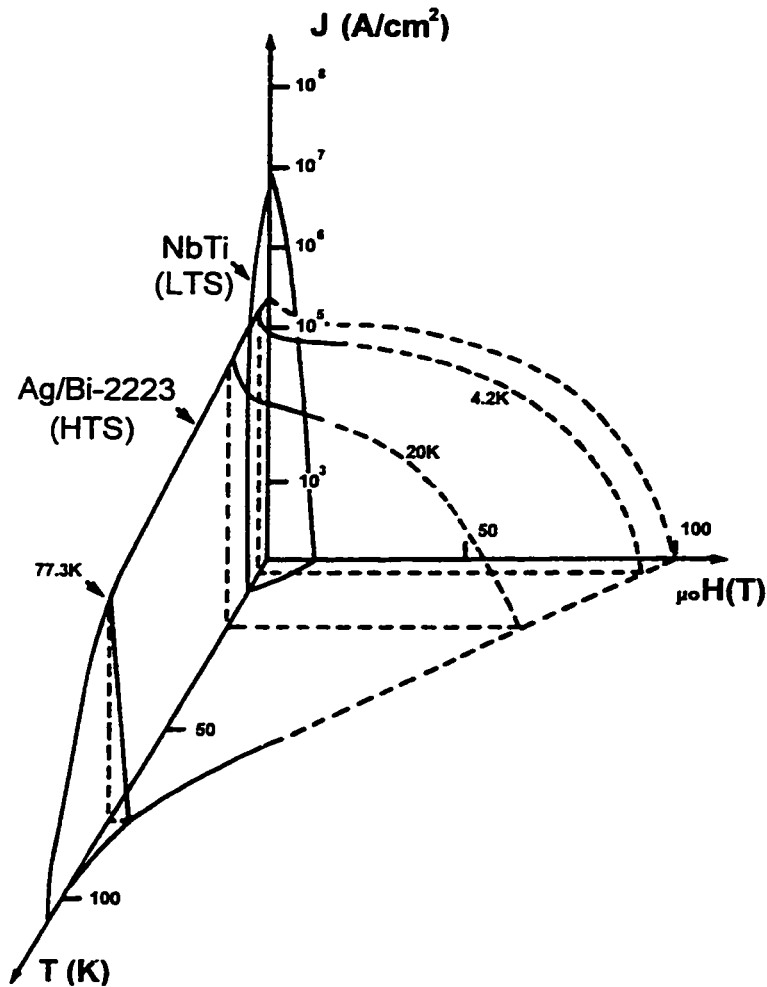


Figure 2.3: Dépendence de J_c avec la température et le champ magnétique.

2.2 Principe de la configuration “noyau de fer blindé” (NFB)

Le limiteur supraconducteur exploite avantageusement les propriétés uniques des matériaux supraconducteurs qui présentent une impédance non-linéaire en fonction du courant. En effet, lorsqu'on excède le courant critique d'un supraconducteur, il développe progressivement un état résistif. La figure 2.4 montre la courbe VI d'un fil supraconducteur mesuré par l'équipe de l'IREQ. La courbe présente une région de pente nulle ainsi qu'une croissance de pente au-dessus de $I_c = 8A$. Cette caractéristique démontre l'absence de résistance pour $I < I_c$ ainsi qu'un passage progressif à l'état résistif pour $I > I_c$.

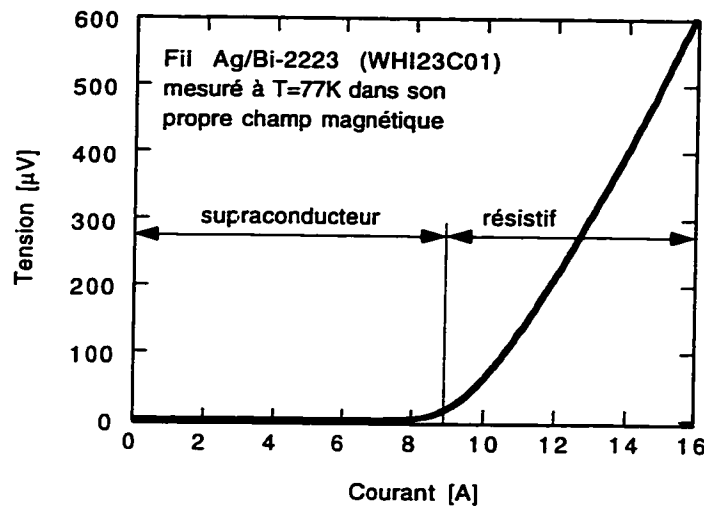


Figure 2.4: Passage à l'état résistif d'un fil supraconducteur.

Cette propriété trouve une application immédiate dans la limitation de courant. Par exemple le concept résistif d'un limiteur supraconducteur de courant repose sur l'insertion dans un circuit électrique d'une section S d'un matériau supraconducteur de densité de courant critique J_c . Le matériau autorise la supraconduction en régime nominal jusqu'à un courant $I_c = J_c \times S$. En régime de court-circuit le courant de défaut dépasse I_c et sera limité par la résistance développée par le supraconducteur. Les avantages théoriques du limiteur supraconducteur sont la transparence pour la ligne à courant nominal, la forte impédance de limitation lors d'un court-circuit, une consommation de puissance (active et réactive) minime et une chute de tension réduite à ses bornes.

Actuellement Hydro-Québec et Siemens travaillent conjointement sur le développement de ces limiteurs. Siemens étudie un modèle résistif [9] alors qu'Hydro-Québec s'intéresse à un type inductif [10] dont nous allons décrire quelques caractéristiques. Le modèle inductif s'apparente à un transformateur dont le secondaire est constitué d'une seule spire supraconductrice comme le montre la figure 2.5 créée d'après l'original issu de [10].

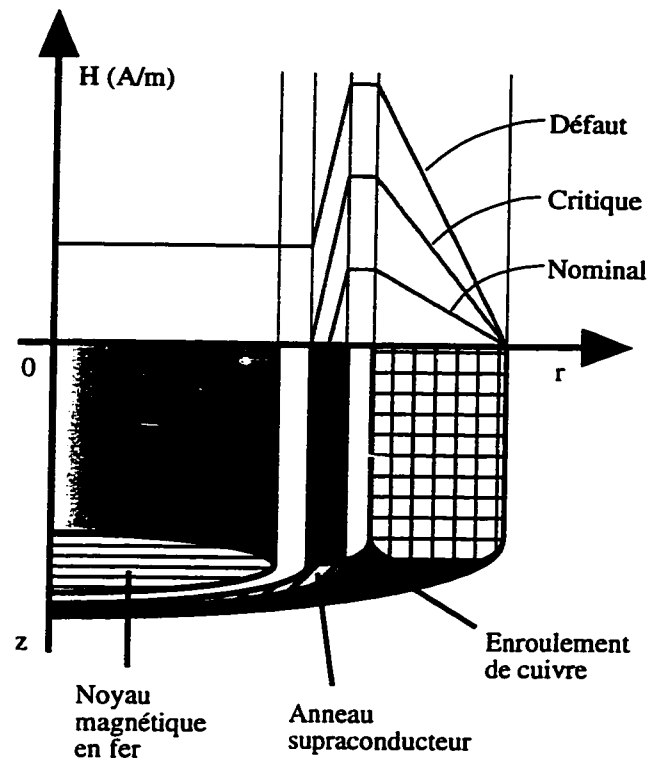


Figure 2.5: Configuration "noyau de fer blindé" d'un limiteur supraconducteur.

Le courant se transmet par induction à l'anneau supraconducteur en rapport du nombre de spires de l'enroulement primaire. Le couplage inductif autorise des prises intermédiaires de réglage au primaire. L'absence de contact sur le supraconducteur minimise les pertes cryogéniques et permet de réduire la taille du cryostat à celle du supraconducteur.

Le courant de la ligne traverse l'enroulement primaire créant un champ magnétisant, H . À charge nominale, les supracourants induits dans l'anneau supraconducteur blindent parfaitement le noyau de fer de tout champ magnétique. Le limiteur présente une faible impédance provenant du flux de couplage et de la résistance du primaire en cuivre. Lors d'un défaut en ligne, le courant critique est dépassé, le champ pénètre entièrement le supraconducteur jusqu'au fer où il est multiplié par la perméabilité effective du noyau magnétique, μ_{eff} . Dans ces conditions, la dissipation de chaleur dans le supraconducteur

produit une composante résistive alors que l'énergie magnétique accumulée dans le fer donne lieu à une contribution inductive. Si on néglige la résistance du primaire, les inductances de fuite et les pertes fer du noyau, le circuit équivalent de ce limiteur inspiré de [11] se réduit à celui de la figure 2.6.

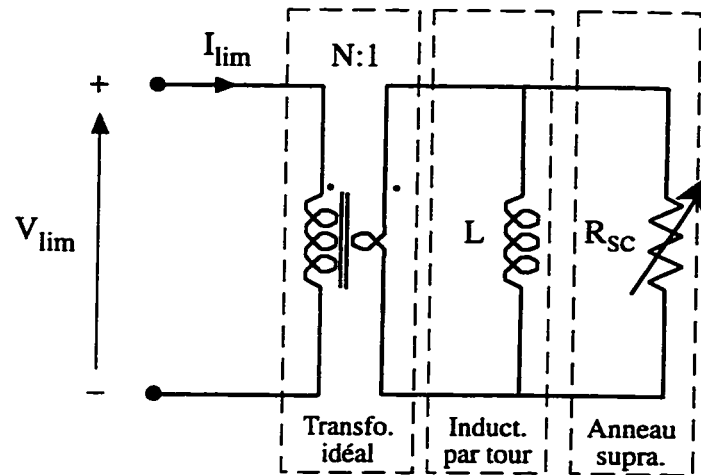


Figure 2.6: Modèle simplifié de la configuration NFB.

De ce schéma équivalent on déduit l'expression de l'impédance de limitation formée de la mise en parallèle de l'inductance du noyau avec la résistance de l'élément supraconducteur. L'expression de cette impédance dont la variable temporelle est la résistivité du supraconducteur $\rho_{sc}(t)$, est montrée à la page suivante. En régime normal, le supraconducteur dérive tout le courant, masquant complètement la présence du noyau de fer (justifiant la terminologie de noyau de fer blindé). Lors d'un défaut, le supraconducteur développe une résistance laissant apparaître une contribution inductive à l'impédance de limitation. Cette impédance se voit multipliée par N^2 lorsqu'on la ramène au primaire, c'est-à-dire aux bornes du limiteur de courant.

$$Z_{lim}(t) = \frac{N^2}{\sqrt{\left[\frac{1}{R_{sc}(t)}\right]^2 + \left[\frac{1}{L\omega}\right]^2}} \quad \text{impédance du limiteur } [\Omega]$$

$$\Phi_{lim}(t) = \tan^{-1} \left[\frac{R_{sc}(t)}{L\omega} \right] \quad \text{angle de phase de l'impédance [rad]}$$

$$R_{sc}(t) = \rho_{sc}(t) \frac{l_{sc}}{S_{sc}} \quad \text{résistance du supraconducteur } [\Omega]$$

$$L = \mu_{eff} \mu_o \frac{S_{fer}}{l_{fer}} \quad \text{inductance par tour du noyau [H]}$$

La résistivité ρ_{sc} dépend de T , H , et J auxquels est soumis le supraconducteur. Une résistance se développe lorsque $J > J_c$. Le graphique de la figure 2.7, crée d'après l'original issu de [10], illustre les deux régimes tantôt résistif, tantôt inductif de ce modèle simplifié. Lorsque $R_{sc} \ll L\omega$, Z_{lim} tend vers $N^2 R_{sc}$ et le régime est résistif; lorsque $R_{sc} \gg L\omega$, Z_{lim} tend vers $N^2 L\omega$ qui est principalement inductif.

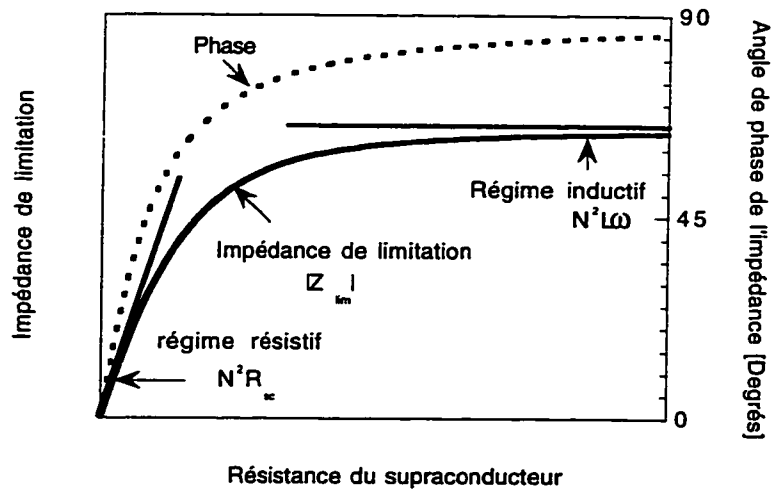


Figure 2.7: Régime résistif et régime inductif d'un limiteur NFB.

Le test de prototype à échelle réduite de 10 à 100 kVA vise à évaluer la faisabilité d'un limiteur pleine échelle destiné au réseau de distribution à 25 kV. Pour cela nous avons défini une liste de variables et d'indices présentée au tableau 2.1. Cette liste qui est un extrait de celle qui sera publiée dans [12] permet de quantifier les performances de n'importe quel limiteur de courant de défaut. Ce tableau servira à compiler au chapitre 4 le résultat des évaluations de prototypes de limiteur de courant de défaut mesurés avec un circuit d'essai décrit au chapitre 3.

Tableau 2.1: Liste de paramètres et indices de performance.

Paramètres	Définitions
V_{nom}	Tension efficace de la ligne
V_{lim}	Tension efficace du limiteur
I_{nom}	Courant nominal de la ligne
$P_{nom} = V_{nom} I_{nom}$	Puissance nominale du limiteur
$P_{loss} = V_{lim} I_{nom} \cos\phi$	Pertes en régime nominal
$\delta = V_{lim}/V_{nom}$	Indice de chute de tension
$\gamma = P_{loss}/P_{nom}$	Indice des pertes
$Z_{lim} = R_{lim} + jX_{lim}$	Impédance du limiteur
τ_a	Temps de réponse du défaut à la première crête
v_p	Tension crête induite au limiteur
i_{pul}	Courant crête de défaut non-limité
i_p	Courant crête de limitation
$\eta_0 = i_p/(I_{nom} \times \sqrt{2})$	Indice crête de surintensité de courant
I_u	Courant efficace de défaut non-limité
I_l	Courant efficace de limitation (sur ~ 50ms)
$\eta_1 = i_{pul}/i_p$	Indice crête de limitation
$\eta_2 = I_u/I_l$	Indice efficace de limitation (sur ~ 50ms)
$I^2t = \int (i_{lim})^2 dt$	I^2t de la durée du défaut (sur ~ 50ms)
$E_{lim} = \int (v_{lim} i_{lim}) dt$	Énergie absorbée par le limiteur lors d'un défaut
τ_r	Temps de recouvrement après une opération

3. UN CIRCUIT D'ESSAI DE LIMITEUR DE COURANT SUPRACONDUCTEUR

Ce chapitre détaille les choix de l'appareillage du circuit d'essai qui ont précédé sa réalisation. L'aspect de la sécurité des personnes et des équipements revêt une importance particulière puisque les essais effectués en laboratoire mettent en jeu des puissances appréciables à 600 V. La mise en service a permis de valider le fonctionnement de l'ensemble des organes et de comparer les effets de la source sur un essai.

3.1 Généralités sur le circuit d'essai

Le circuit d'essai devait recréer à échelle réduite des conditions similaires à celles présentes sur une ligne d'un réseau de distribution à 25 kV. Ces conditions comprennent le régime permanent à puissance nominale et le régime transitoire de court-circuit. Pour des raisons pratiques d'installation, une puissance nominale monophasée de 100 kVA à 600 V (entre phases) a été retenue. Durant un court-circuit de plusieurs cycles, le courant limité par le prototype atteint 3 à 8 fois sa valeur nominale. La figure 3.1 montre le schéma du circuit dont les connexions sont triphasées jusqu'en amont du contacteur d'alimentation.

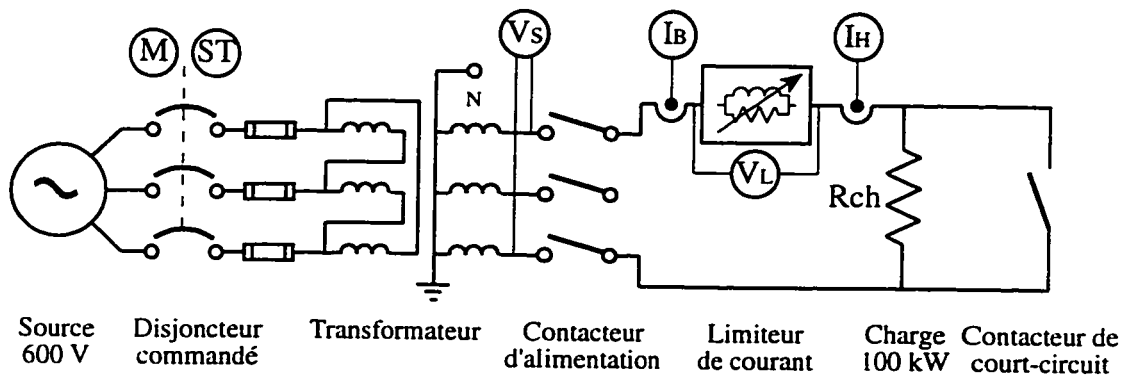


Figure 3.1: Schéma du circuit d'essai avec son appareillage de puissance.

3.2 Choix de l'équipement de puissance

Cette section énumère les différents organes de puissance du circuit et discute des contraintes techniques justifiant le choix de l'appareillage.

3.2.1 La source d'alimentation

Nous disposons d'une ligne d'alimentation triphasée 600 V/200 A. Même si le circuit ne draine que 100 kVA en régime normal, le déséquilibre de charge et les forts courants absorbés lors d'un défaut excèdent le seuil de protection de la ligne. En conséquence nous avons acheté un groupe moteur-générateur⁴ dont l'installation est montrée à la figure 3.2.

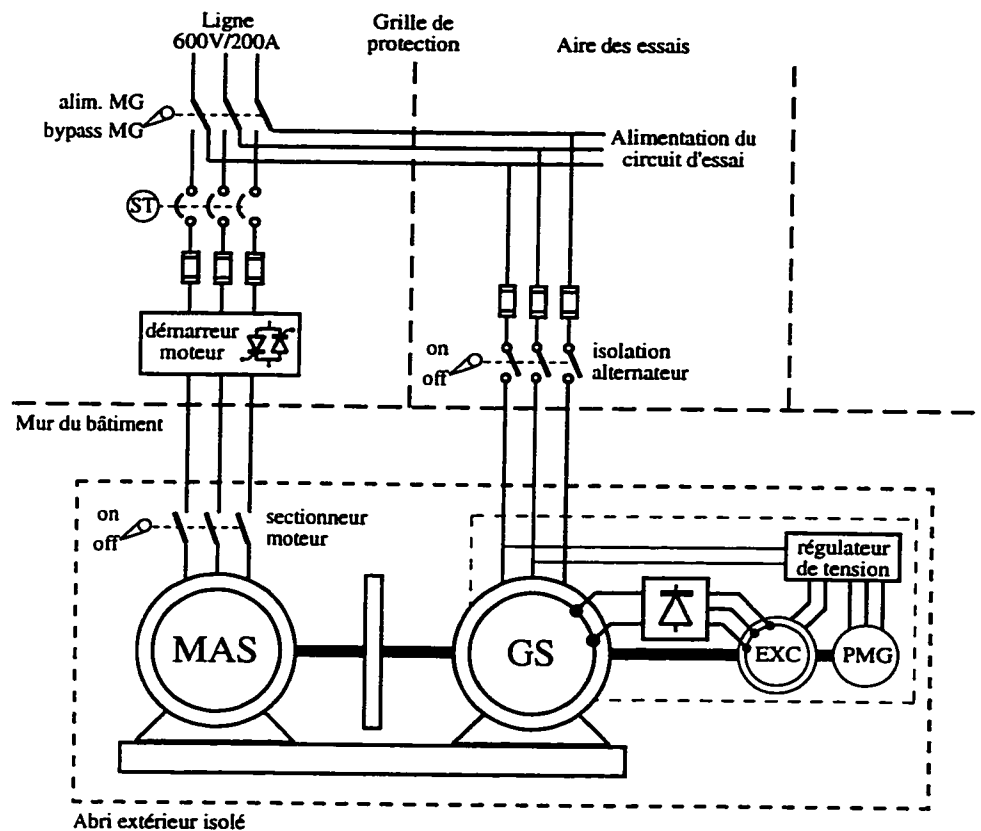


Figure 3.2: Synoptique du groupe moteur-générateur et de l'installation électrique.

⁴ Les spécifications techniques du groupe MG sont détaillés en annexe II.

Outre, l'isolation du circuit, un alternateur triphasé de 750 kVA offre une meilleure régulation de tension et un courant de court-circuit⁵ plus élevé que la ligne triphasée 600 V/200 A. Un volant d'inertie porte à un mégajoule l'énergie cinétique totale du groupe tournant. Cette énergie accumulée au démarrage modère la perte de vitesse (donc de fréquence de l'alternateur) à 3% lors d'un défaut limité à 600 kW pendant 5 cycles selon le calcul suivant:

$$W_{initial} = \frac{1}{2} J \omega_{initial}^2 = 1 \text{ MJ } 60 \pi \text{ rad/s} \Rightarrow J = 56,3 \text{ kg.m}^2$$

$$W_{defaut} = \frac{P \times t}{\eta_{altern.}} = \frac{600 \text{ kW} \times 83,3 \text{ ms}}{0,8} \Rightarrow W_{defaut} = 62,5 \text{ kJ}$$

$$W_{defaut} = \frac{1}{2} J (\omega_{initial}^2 - \omega_{final}^2)$$

$$\omega_{final} = \sqrt{\omega_{initial}^2 - \frac{2W_{defaut}}{J}} = \sqrt{(60\pi)^2 - \frac{2 \times 62500}{56,3}} = 182,5 \text{ rad/s}$$

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{\omega_{final} - \omega_{initial}}{\omega_{initial}} = \frac{182,5 - 60\pi}{60\pi} = -3,2\%$$

3.2.2 Les transformateurs abaisseurs de tension

Nous disposons d'un transformateur 600 V/208 V/75 kVA et d'un autotransformateur 600 V/480 V/150 kVA permettant d'obtenir 480 V, 208 V ou 120 V à partir du 600 V primaire. Pour un essai à tension réduite on insère le transformateur requis entre le disjoncteur et le contacteur d'alimentation. Lors de la mise sous tension du transformateur, le flux magnétique découlant de l'intégrale de la tension peut saturer le fer et entraîner un courant d'appel élevé pour plusieurs cycles (environ $8 I_{nom}$ sur 0.1s). Le contacteur d'alimentation isole le circuit d'essai de ce phénomène transitoire susceptible de produire une baisse de tension.

⁵ La caractéristique en court-circuit du générateur est montrée en annexe III.

3.2.3 La charge de 100 kW

La valeur de la charge fixe le courant et la puissance du circuit à une tension donnée. Nous voulions une charge résistive ($\cos\phi=1$) configurable de 0 à 100 kW à diverses tensions jusqu'à 600 V. Il existe sur le marché des bancs de charge ventilés, mais le manque de souplesse de ces produits et la dissipation de chaleur dans l'air ambiant a orienté notre choix vers une solution sur mesure. D'après les conseils recueillis au service Appareillage électrique de l'IREQ, nous avons choisi de dissiper l'énergie par le biais de 44 éléments chauffants plongeant dans un réservoir d'eau froide selon le croquis de la figure 3.3.

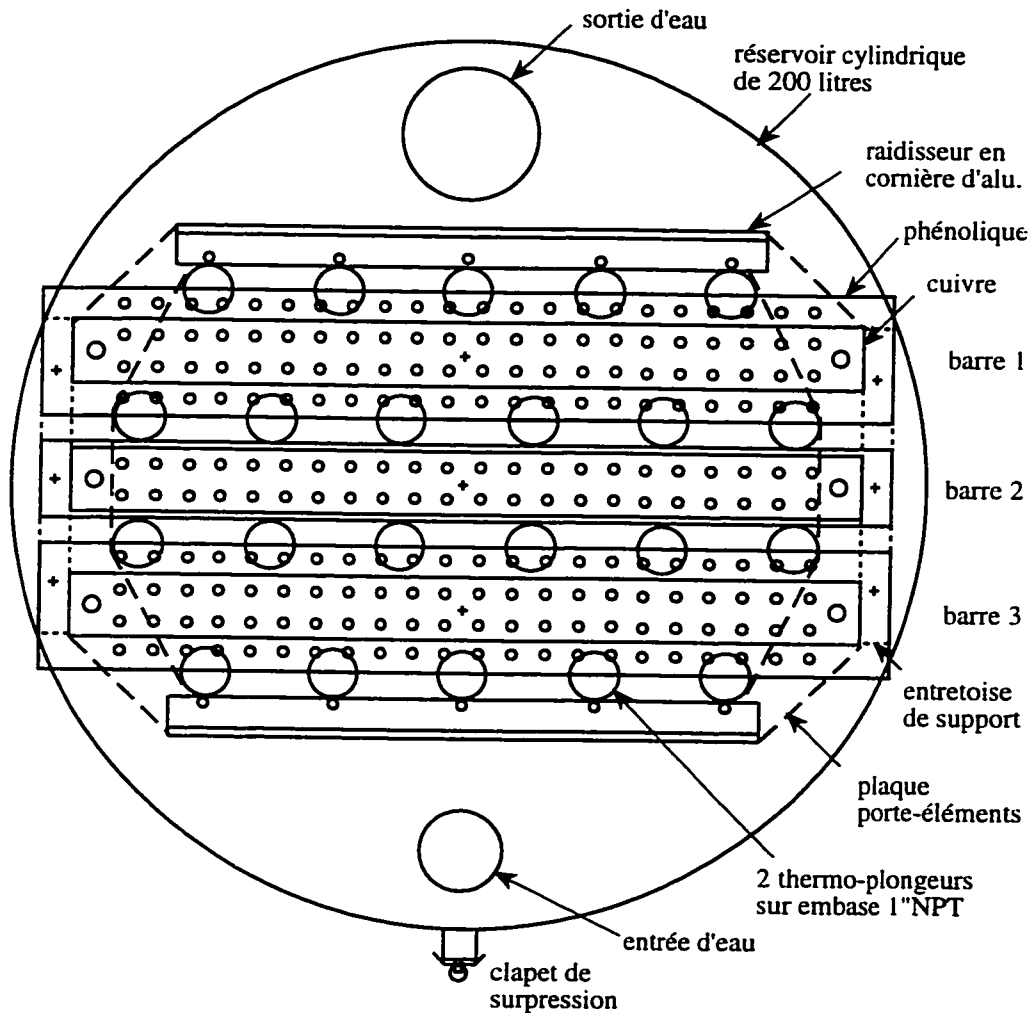


Figure 3.3: Croquis de la charge 100 kW/600 V.

Les éléments de 2,5 kW/ 208V chacun sont vissés sur le côté d'un réservoir et se terminent par une paire de fils munis de fiches bananes. Toute association série-parallèle est permise grâce à un ensemble de 3 barres perforées mixtes cuivre/phénolique. La charge accepte aussi bien un couplage monophasé que triphasé. En monophasé, la charge peut être répartie entre les barres 1-3 et les barres 2-3. Cet arrangement autorise des échelons de charge simulant les effets d'un limiteur de courant. Sans circulation d'eau, la température interne s'élève de 70 °C en moins de 10 minutes si l'on maintient 100 kW de charge. Un débit d'eau de 0,35 L/s suffit à stabiliser la température à 90 °C. Ces valeurs proviennent du calcul suivant:

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_{H_2O}(T) dT ; c_{H_2O}(T) \approx Cte \equiv 4180 \text{ J/(kg.K)} \Rightarrow Q = m c_{H_2O} (T_2 - T_1)$$

$$W_{elec} = \int p(t) dt ; p(t) = Cte = 100 \text{ kW} \Rightarrow W_{elec} = P \times t$$

$Q = W_{elec}$ en négligeant la dissipation par convection et radiation

$$t = \frac{m \times c_{H_2O} \times (T_2 - T_1)}{P} = \frac{200 \times 4180 \times (90 - 20)}{100 \times 10^3} = 585 \text{ s d'utilisation à début nul}$$

$$P = \dot{Q} = \dot{m} c_{H_2O} (T_2 - T_1) \Rightarrow \dot{m} = \frac{P}{c_{H_2O} \times (T_2 - T_1)}$$

$$\dot{m} = \frac{100 \times 10^3}{4180 \times (90 - 20)} = 0.342 \text{ kg/s d'eau à } 20^\circ\text{C pour maintenir } T_{charge} = 90^\circ\text{C}$$

Un clapet de sécurité taré en usine à 20,7 kPa (3 psi) évite toute surpression dangereuse à l'intérieur du réservoir. Actuellement, l'opération de la charge ne dépassant pas quelques dizaines de cycles par essai, la circulation d'eau est inutile. Pour des essais plus long, un renouvellement continu de l'eau est nécessaire. Nous prévoyons d'installer un système de circulation forcée muni d'un échangeur extérieur afin d'évacuer la chaleur produite sans gaspiller de l'eau.

3.2.4 Le disjoncteur à déclenchement commandé

Le disjoncteur motorisé de type “shunt trip” sert à la fois d’interrupteur de sécurité et d’organe de coupure du courant de défaut. Son pouvoir de coupure (200 kA) largement supérieur au niveau maximal de court-circuit du générateur (8 kA L-L symétrique) lui confère une grande robustesse face à l’usure des contacts. Deux interrupteurs-poussoirs commandent à distance la fermeture et l’ouverture motorisée des contacts. En présence du 600 V, l’ouverture en mode rapide s’effectue en 2 cycles par la bobine de déclenchement instantané. Nous utilisons le mode de déclenchement instantané pour commander à l’instant voulu l’ouverture automatique des contacts via une séquence programmée.

3.2.5 Les contacteurs d’alimentation et de court-circuit

La fermeture du contacteur d’alimentation débute la séquence automatique de l’essai par l’alimentation à régime nominal (ex: 100 kW à 600 V). Le régime de défaut intervient à l’instant de la fermeture du contacteur de court-circuit. Le court-circuit de la charge ramène instantanément la tension de source aux bornes du prototype dont l’impédance croît avec le courant. Le courant de défaut limité (3 à 8 p.u.) est interrompu par le déclenchement du disjoncteur. Afin de conserver des temps de réponse constant, les bobines de manoeuvre des contacteurs sont à courant continu (120V cc). La figure 3.4 montre le schéma, avec bornier numéroté de 1 à 10, des alimentations équipant chacun des boîtiers de contacteur.

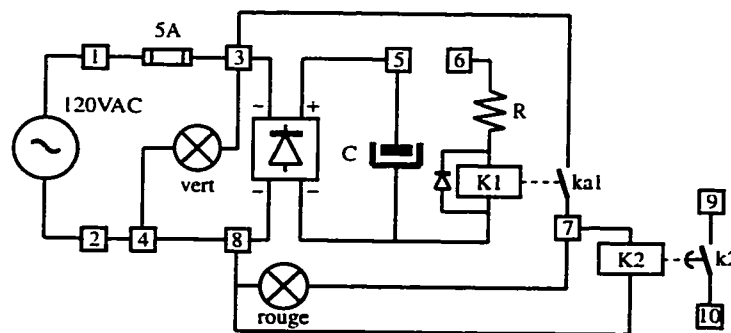


Figure 3.4: Schéma électrique des alimentations de commande des contacteurs.

Le relais temporisé K2 n'existe qu'avec le contacteur de court-circuit. La tension réseau 120 V ca est converti en 170 V cc après redressement et filtrage capacitif. Une résistance R écrête les 50 V excédentaires lorsqu'elle est traversée par le courant de maintien du contacteur. Deux voyants, un vert et un rouge, indiquent la présence du 120 V ca et l'état du contacteur. Le contacteur d'alimentation peut commuter 200 A à 600 V. Par contre le contacteur de court-circuit possède un seul contact de 48 V/100 A acceptant 2000 A à l'établissement de courant.

3.3 Protection des personnes et de l'équipement

La connaissance des paramètres d'un essai (tension, courant, puissance, durée) et le choix approprié de l'appareillage constitue le premier niveau de sécurité. Il faut ensuite considérer les conditions anormales comme par exemple un court-circuit non-limité et prévoir des protections adaptées, avec ou sans redondance.

3.3.1 Protection périmétrique

Elle prévient tout contact physique de l'opérateur avec les parties sous tension. Les organes de commande et leurs connexions sont enfermés dans des coffrets NEMA 4 montés au mur. Un chemin de câble retient au mur la paire de conducteur souple 2/0 qui relie les différents coffrets. Une grille mise à la terre bloque l'accès à la zone d'essai. L'ouverture de la grille déclenche immédiatement le disjoncteur mettant hors tension le circuit. Enfin, un arrêt d'urgence s'ajoute aux interrupteurs-poussoir de télécommande du disjoncteur.

3.3.2 Barrière d'isolation de signaux

Les signaux de contrôle et d'acquisition traversent des modules opto-isolés à 3 kV regroupés respectivement dans un boîtier d'interface et d'acquisition. Le câble de contrôle porte 3 signaux TTL aboutissant dans le boîtier d'interface de sortie. Deux modules 300 V cc/5 A pilotent les contacteurs et un module 240 V ca/5 A commande le disjoncteur.

3.3.3 Protection contre la surcharge et les courts-circuits

Des jeux de fusibles protègent diverses sections du circuit contre les défauts involontaires. Le moteur d'entraînement, l'alternateur et le circuit d'essai ont chacun leurs propres fusibles. Le démarreur du moteur comprend une protection thermique de surcharge. Un disjoncteur magnéto-thermique en boîtier moulé protège la ligne 600 V/200 A. Son déclenchement instantané se fait autour de 1000 A (5 fois la capacité nominale) et le réglage du relais thermique autorise 900 A pour 0,5 s. La protection amont du même type se situe au départ de la ligne principale 600 V/400 A du laboratoire. L'usage du MG est indispensable à des niveaux de courant supérieur à 1000A.

3.3.4 Sécurité câblée sur la durée du défaut

Une perte de contrôle de la séquence programmée se produit si nos instruments deviennent inopérants suite à une baisse de tension ou à un autre problème. Une temporisation de type "chien de garde" déclenche le disjoncteur dans un délai fixé après le court-circuit de la charge. Un retard à la fermeture de K2 (figure 3.4), plus long que la durée programmée du défaut, force l'ouverture du disjoncteur de façon indépendante. Cette protection de relève établit une redondance avec notre logique programmée.

3.4 Instrumentation et acquisition de données

Des capteurs de mesure convertissent les grandeurs physiques à mesurer en signaux électriques. L'ensemble de ces signaux convergent vers un boîtier local de mesure où ils sont isolés et amplifiés. Un câble blindé de 25 paires achemine les mesures sous forme de tension ± 5 V/50 Ω aux instruments de mesure. Les capteurs de mesure, le conditionnement de signal et l'acquisition de donnée, montrés à la figure 3.5, sont décrits brièvement dans les trois paragraphes suivants.

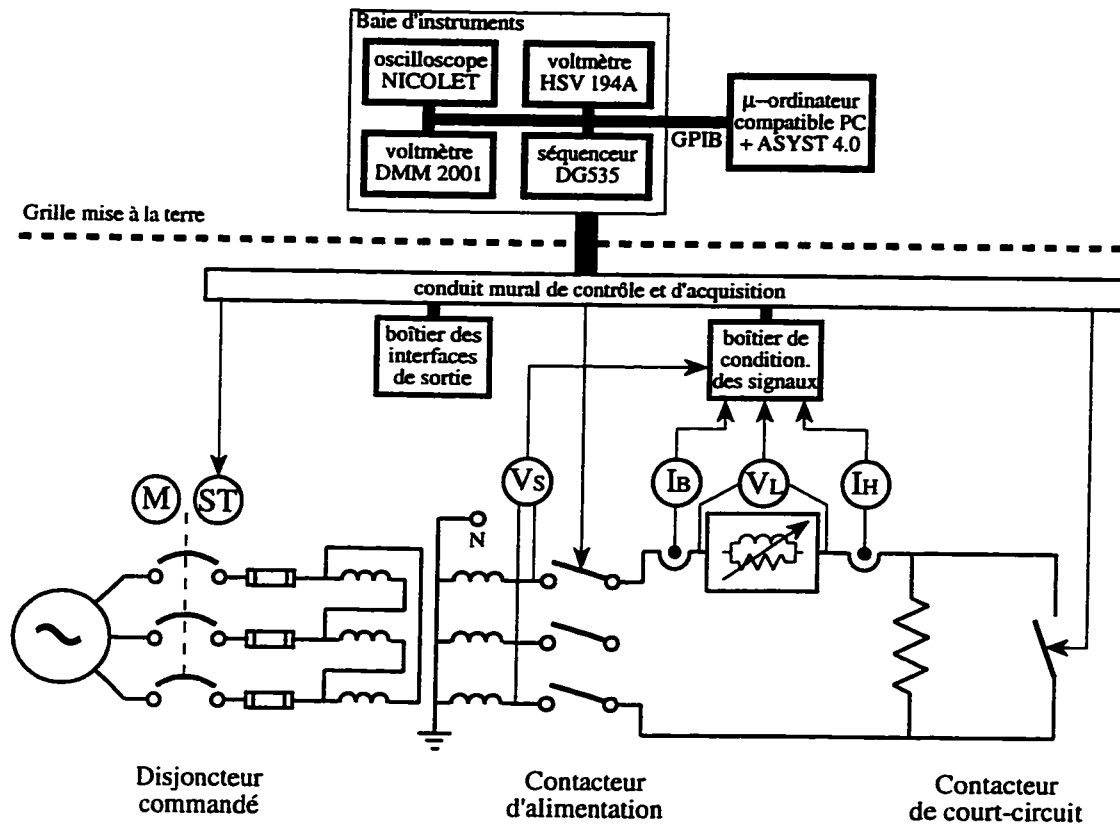


Figure 3.5: Synoptique des systèmes d'acquisition et de contrôle.

3.4.1 Les capteurs de mesure

La tension est mesurée à l'entrée du contacteur d'alimentation et aux bornes du limiteur de courant. Nous avons utilisé deux sondes opto-isolées à piles. Ces sondes permettent une mesure différentielle flottante sur une gamme de ± 1000 V instantanés. Elles ont une précision de ± 2 % et un choix d'atténuation de 500:1 ou de 50:1.

Le courant est mesuré à l'aide de deux capteurs, l'un ayant un gamme adapté au régime nominal, l'autre à celui du défaut. Le premier capteur de type ZFCT (Zero Flux Current Transformer) mesure le courant dans la gamme ± 300 A instantanés. Le deuxième capteur est un transformateur de courant à large bande (WBCT) dont la gamme couvre ± 8400 A crête

sinusoïdaux. Les deux technologies reposent sur le couplage magnétique du courant à mesurer avec le capteur de forme toroïdale. L'absence de contact physique avec le circuit confère une isolation passive à la mesure. Le fer du WBCT sature à basse fréquence si l'on excède son $I_{\tau_{\max}}$. Les ZFCT requièrent une source cc qui alimente un asservissement de courant à flux nul mesuré par une sonde à effet Hall. Cette méthode autorise la mesure de courant continu en régime permanent.

Les autres mesures concernent l'instrumentation interne au prototype sous test. On mesure le flux magnétique sur la section externe et interne du supraconducteur à l'aide d'enroulements de cuivre émaillé. La valeur du flux se calcule par intégration de la tension induite sur la bobine. Quelques thermocouples de type K surveillent la température en divers points. Une source de courant isolée injecte 10 mA à 60 Hz aux bornes du limiteur. Un suivi constant de la tension engendrée par ce courant nous renseigne sur l'évolution de l'impédance à 60 Hz du limiteur, en particulier après l'interruption du défaut.

3.4.2 Conditionnement local des signaux

A proximité du prototype sous test, un boîtier rassemble sur de courtes distances tous les signaux en provenance des capteurs de mesure. Ce boîtier contient un bloc régulé 5V/3A alimentant une carte électronique de 16 modules enfichables. Chaque module, conçu spécialement pour un type de mesure (tension, température, jauge de contrainte...) isole et amplifie le signal d'un capteur. L'étage de sortie de chaque module ($\pm 5 \text{ V}/50 \Omega$) confère aux mesures une excellente immunité au bruit. Les voies 13 à 16 sont dédiées aux 4 mesures de tension et courant. Un pontage de ces voies remplace les modules car les sondes de tension et les transformateurs de courant assurent eux-même l'isolation et l'amplification de leurs signaux. La voie 4 reçoit un module de tension $\pm 50 \text{ mV}$ attribué au suivi d'impédance du limiteur à 60 Hz.

3.4.3 Contrôle et acquisition de données

Le système d'acquisition de données se compose d'une baie d'instruments et d'un micro-ordinateur PC raccordés par un bus d'interface GPIB. Un oscilloscope à mémoire Nicolet Pro44 prend en charge les canaux de tension et courant du circuit (voies 13 à 16). Un voltmètre rapide Keithley HSV 194A ajoute deux canaux de mesure de flux magnétique (voies 1 et 2). Enfin, un voltmètre Keithley DMM 2001 enregistre l'impédance du limiteur en conjonction avec la source 10 mA/60 Hz (voie 4).

Un générateur d'impulsion à retard programmable Stanford DG535 s'occupe entièrement du contrôle et de la synchronisation de la séquence d'un essai.

Un programme en langage ASYST 4.0 a été développé par l'équipe supraconductivité pour gérer la saisie des paramètres d'essai, la communication entre les instruments et la sauvegarde des fichiers de données. Un essai produit trois fichiers ASCII dont les extensions sont .NIC, .HSV et .DMM respectivement pour les points de mesure de l'oscilloscope Nicolet, du voltmètre HSV 194A et du voltmètre DMM 2001.

3.5 Mise en service du circuit d'essai

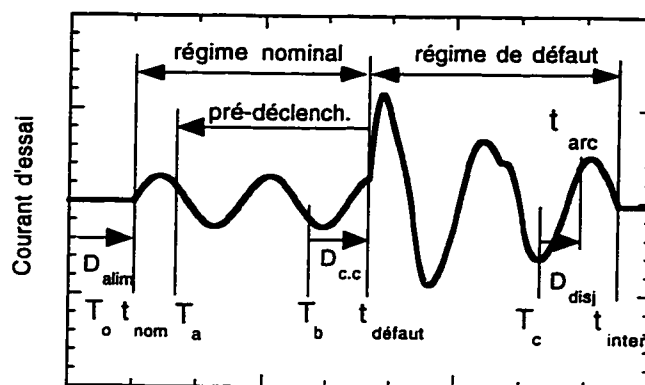
La mise en service du circuit⁶ a permis de mesurer les temps de réponse des organes, de tester l'alternateur et de valider les systèmes de contrôle et d'acquisition de données.

3.5.1 Séquence d'un essai en charge avec défaut

Le générateur d'impulsion à retard programmable (DG535) possède cinq sorties principales de contrôle T_0 , T_a , T_b , T_c , T_d et une entrée de synchronisation externe. Chaque sortie change d'état logique après une durée spécifique par rapport à l'instant T_0 . Les changements d'état respectent l'ordre des sorties, T_0 commençant la séquence à $t = 0$ et T_d la terminant à $t = T_d$.

⁶ Un fiche d'utilisation détaille la procédure de mise route en annexe IV.

L'image de la tension de source est injectée sur l'entrée de synchronisation externe du DG535 de sorte que le passage à zéro de la tension source déclenche la séquence. La transition du régime nominal à celui de défaut a lieu à l'instant du court-circuit de la charge. Cet instant, superposé à l'onde 60 Hz définit l'angle de défaut, un paramètre central de la séquence. Le déroulement d'un essai est présenté à la figure 3.6 qui montre la corrélation des instants T_0 , T_a , T_b , T_c avec le courant d'essai. La commande d'un organe est avancée de son temps de réponse de manière à conserver le synchronisme des régimes nominal et de défaut avec la tension de source.



Définitions

	Temps
régime nominal	: fonctionnement à charge nominale
régime de défaut	: fonctionnement avec charge court-circuitée
angle de défaut	: retard du défaut sur le dernier zéro de tension
pré-déclenchement	: période de mesure avant le régime de défaut
$t_{\text{nom}} = T_0 + D_{\text{alim}}$: début du régime nominal
$t_{\text{défaut}} = T_b + D_{\text{c.c.}}$: début du régime de défaut
$t_{\text{inter}} = T_c + D_{\text{disj}} + t_{\text{arc}}$: interruption du courant de défaut

Constantes électro-mécaniques

$D_{\text{alim}} = 26 \text{ ms}$: retard à la fermeture du contacteur d'alimentation
$D_{\text{c.c.}} = 34 \text{ ms}$: retard à la fermeture du contacteur de court-circuit
$D_{\text{disj}} = 45 \text{ ms}$: retard à l'ouverture des contacts du disjoncteur
$t_{\text{arc}} (> 5 \text{ ms})$: temps d'extinction de l'arc entre les contacts du disjoncteur

Séquence des sorties de contrôle

T_0 :	instant de l'ordre de fermeture du contacteur d'alimentation
T_a :	instant du début de l'acquisition des données
T_b :	instant de l'ordre de fermeture du contacteur de court-circuit
T_c :	instant de l'ordre d'ouverture du disjoncteur

Figure 3.6: Définition des périodes et instants d'une séquence d'essai.

Les sorties T_o , T_b et T_c actionnent successivement la fermeture du contacteur d'alimentation, la fermeture du contacteur de court-circuit et l'ouverture du disjoncteur. L'acquisition de données, asservie à T_a débute un certain nombre de cycles précédant le défaut grâce à une durée programmée de pré-déclenchement commune et externe à tous les instruments.

3.5.2 Mesures avec un limiteur simulé de 100 kVA

De par sa conception, notre prototype de 100 kVA devrait avoir en régime nominal une impédance faible devant celle de la charge. En limitation de courant, il devrait développer une impédance principalement résistive dans la gamme 0,12 à 0,33 p.u. Une modélisation grossière du limiteur consiste à lui attribuer une impédance nulle en régime nominal et une résistance fixe d'environ 0,12 p.u en régime de limitation. Une répartition des éléments de la charge entre les barres 1-3 et 2-3, telle que montrée à la figure 3.7, recrée les conditions de ce modèle. La charge de $3,3 \Omega$ du régime nominal tombe à $0,6 \Omega$ au moment du court-circuit entre les barres 1 et 2. Dans cette simulation d'un limiteur 100 kVA, le contacteur rajoute des éléments de charge en dérivation, plutôt que court-circuiter la charge comme c'est le cas dans un essai avec un prototype. Cette utilisation de la charge a permis de valider l'ensemble des systèmes du circuit d'essai et en particulier la tenue en tension de la source.

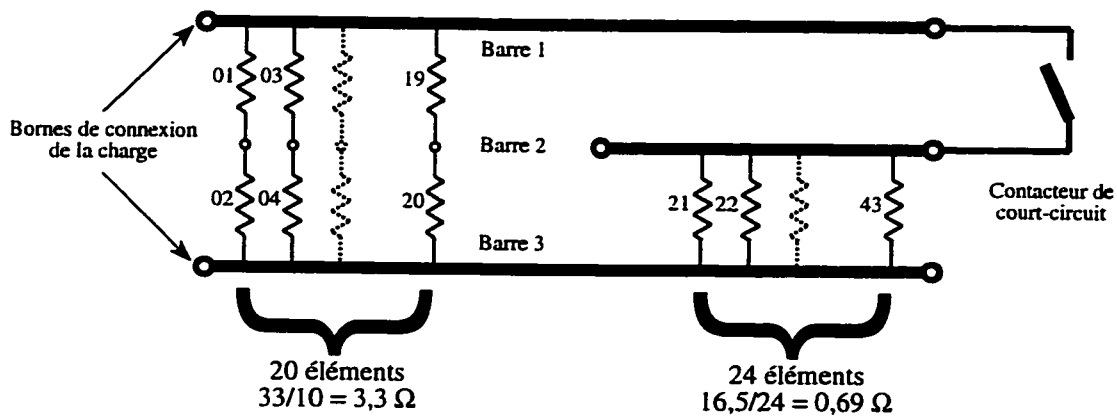


Figure 3.7: Simulation d'un limiteur de courant avec la charge.

La réaction de la source de tension a été analysée en simulant un limiteur de courant avec cette configuration particulière de la charge. Le tableau 3.1 résume l'ensemble des paramètres de l'essai que nous avons conduit tantôt avec le groupe MG tantôt avec la ligne 600 V/200 A afin de comparer l'influence du générateur avec celle de notre réseau.

Tableau 3.1: Paramètres pré-déterminés de l'essai à 100 kW.

Paramètres de l'essai	Valeurs
Tension nominale	600 V
Charge	
nominale	3,3 Ω
en défaut	0,57 Ω
Puissance	
nominale	110 kW
en défaut	600 kW
Courant	
nominal	182 A
en défaut	1000 A
Séquence	
nominal	8 cycles
défaut	2 cycles
pré-déclench.	3 cycles
angle de défaut	0,25 cycle
Instruments de mesure	
Oscilloscope Nicolet	
acquisition	1000 pts
résolution	100 μ s/pt
Ch1: V_{12} source	6 V
Ch2: V_{12} moteur	6 V
Ch3: I charge	30 V
Ch4: I_1 moteur	3 V

Les quatre canaux d'acquisition de l'oscilloscope Nicolet ont suffi à mesurer les grandeurs tension/courant aux bornes de notre circuit d'essai (Ch1 et Ch3) et aux bornes du moteur (Ch2 et Ch4). Les autres instruments ne sont pas utilisés dans ce test dont les résultats sont présentés à la figure 3.8. Les sources semblent se comporter de façon similaire.

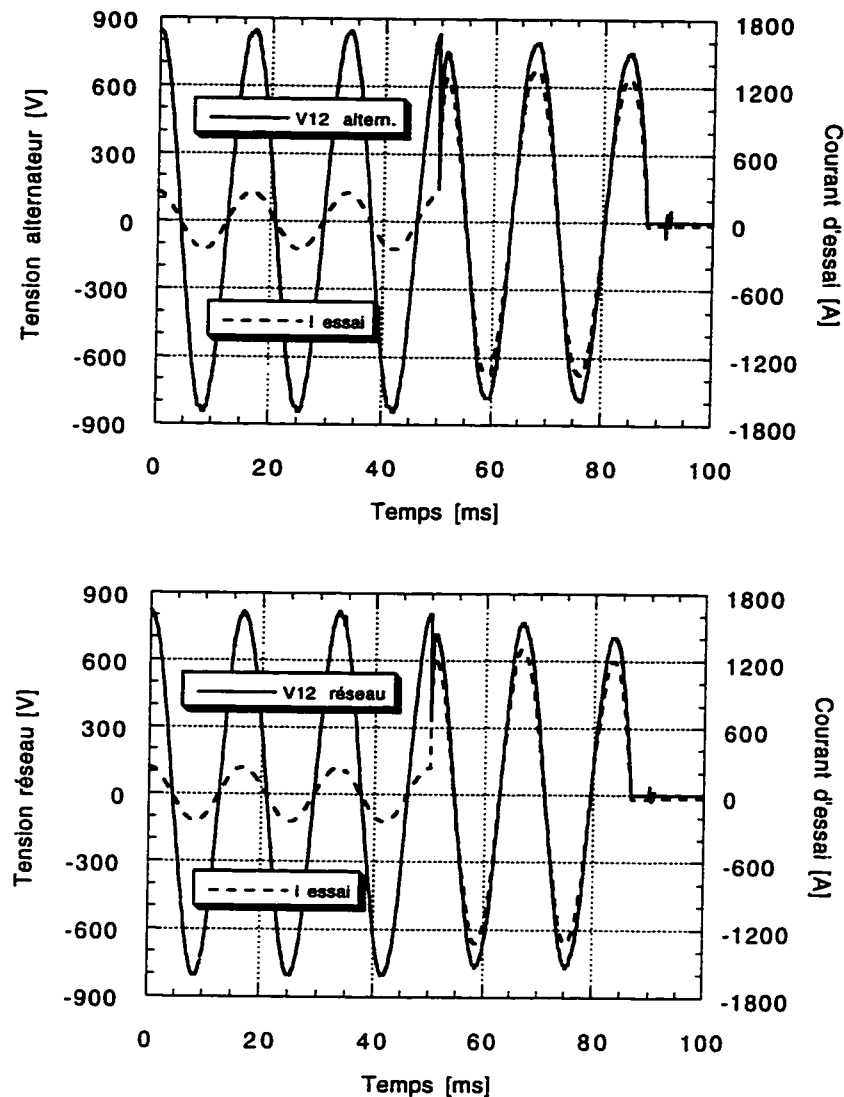


Figure 3.8: Essai à 100 kW alimenté d'abord par l'alternateur puis par le réseau.

La tension de chacune des deux sources chute avec l'apparition du défaut, l'alternateur pouvant maintenir un niveau de tension plus élevé que le réseau. La figure 3.9 rassemble sur le même graphique les tensions des deux sources. À noter que sur ce graphique la tension réseau est avancée de 200 μ s pour synchroniser les courbes à l'origine. Cette superposition des courbes met en évidence une différence d'amplitude et de phase des tensions.

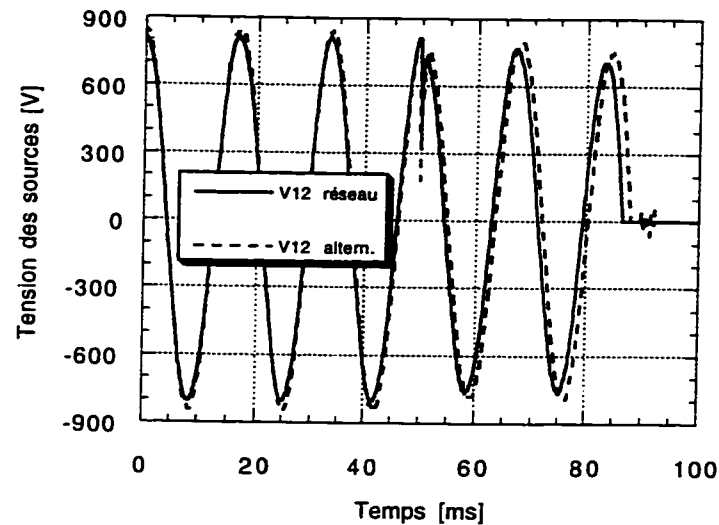


Figure 3.9: Comparaison de la tension des sources.

L'alternateur qui est une machine tétrapolaire ne produit pas une sinusoïde aussi pure que celle du réseau. Par contre, il fournit une tension supérieure à vide et en charge déséquilibrée grâce à son régulateur automatique de tension. Le déphasage apparent des ondes est en réalité un écart en fréquence qui provient du moteur d'entraînement du groupe. Ce moteur asynchrone à haut rendement offre un glissement remarquablement faible de 0,8 % à $P_{\text{nom}} = 150 \text{ kW}$.

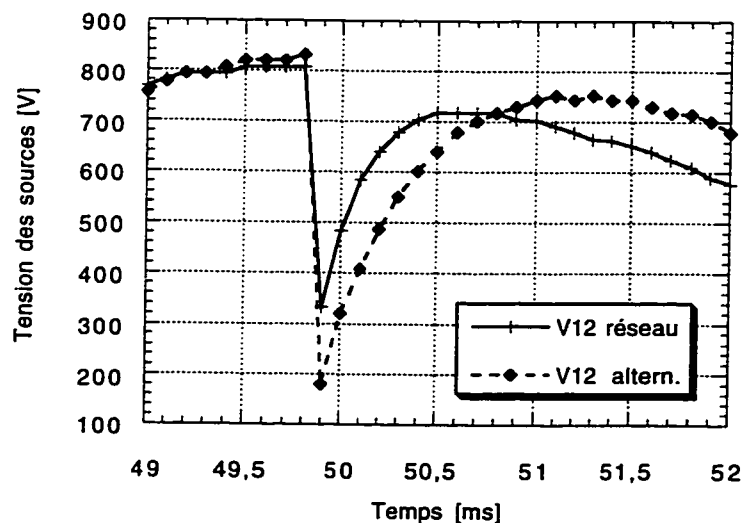


Figure 3.10: Réactions des sources de tension à l'enclenchement du défaut.

L'intervalle 49-52 ms des tensions de source est agrandi à la figure 3.10 pour mettre en évidence la chute instantanée produite par la montée de courant. Le réseau enregistre un creux de tension moins sévère que celui de l'alternateur (474 V contre 653 V). Cependant, après récupération, l'alternateur présente une chute de tension moindre. La figure 3.11 montre les grandeurs électriques tension/courant du réseau alimentant le groupe moteur-alternateur.

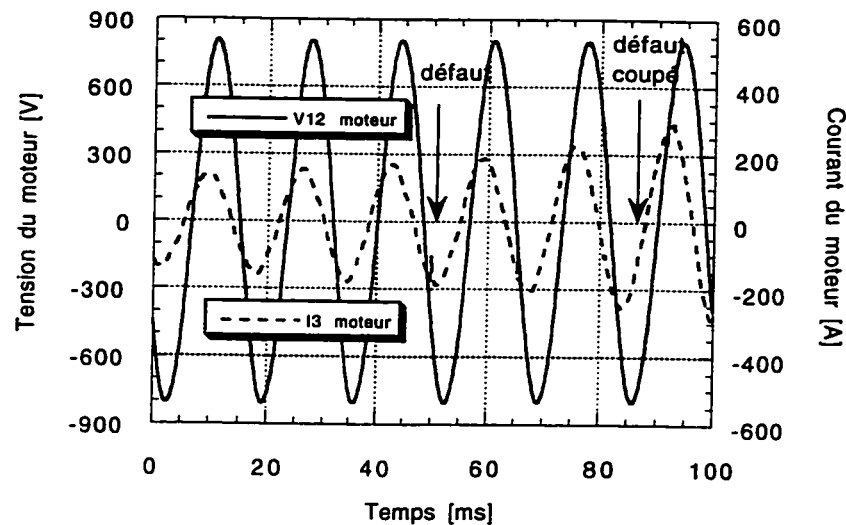


Figure 3.11: Conséquences d'un essai à 100 kVA sur le réseau.

Le volant d'inertie s'oppose à la décélération si bien que le groupe ralentit graduellement après la mise en charge de l'alternateur. Ce ralentissement est perceptible quand on court-circuite la charge. Le moteur absorbe du réseau un courant progressif dont la croissance s'amortit après la fin de la séquence d'essai. Le groupe MG se comporte pour le réseau comme une charge triphasée équilibrée ayant des variations lentes. L'essai n'occasionne aucune perturbation visible sur le réseau puisque la constante de temps mécanique du groupe MG absorbe les effets du courant transitoire fourni par l'alternateur. Le tableau 3.2 compare quelques résultats extraits de ces deux essais par un calcul de valeurs crêtes. Ces résultats caractérisent l'influence des sources sur les paramètres réels de l'essai.

Tableau 3.2: *Influence des sources sur les paramètres d'un essai.*

Paramètres mesurés	Réseau	Alternateur
Tension		
à vide	574 V	600 V
en charge	574 V	597 V
en défaut	543 V	561 V
Courant		
nominal	171 A	176 A
en défaut	930 A	965 A
Puissance		
nominale	98,2 kW	105 kW
en défaut	505 kW	541 kW
Différences de tension		
à vide	4,3 %	0,0 %
en charge	4,3 %	0,5 %
en défaut	9,5 %	6,5 %
Chute de tension		
de 0 à pleine charge (PC)	0,0 %	0,5 %
de PC à court-circuit	5,4 %	6,0 %

En conclusion de ces essais simulés d'un limiteur de courant, nous pouvons dire que le circuit d'essai procure une commande précise et synchrone des séquences de régime nominal et de court-circuit. L'alternateur répond de manière satisfaisante aux surcharges déséquilibrées tout en isolant parfaitement le réseau des perturbations et surintensités que provoquent les essais transitoires à forts courants.

3.6 Ajouts futurs au circuit d'essai

Malgré une puissance triple à celle de notre réseau, l'alternateur présente une chute de tension similaire face aux mêmes transitoires de courant. Ceci s'explique par la différence entre le comportement dynamique d'une machine synchrone subissant de fortes variations de charge à ses bornes et celui d'un grand réseau de faible impédance interne. L'écrasement de la tension provient de la réaction d'induit qui démagnétise l'inducteur et abaisse la f.é.m. de la machine. On représente schématiquement ce phénomène par deux réactances de phase variables dans le temps selon leur constante propre sous-transitoire et transitoire. Le régulateur automatique de tension accepte une option de commande que nous utiliserons afin de saturer momentanément

la machine pendant un essai de limiteur. Le déplacement du point de repos magnétique au-delà du coude de saturation atténuera la baisse de tension durant la surintensité de défaut.

L'installation d'un nouveau système d'acquisition de donnée équipé d'interfaces de sortie et d'un séquenceur remplacera et centralisera les fonctions qu'occupaient l'oscilloscope, le voltmètre rapide et le générateur d'impulsion à retard programmable. Le module numériseur du système comprend 32 canaux dont 16 seront utilisés en conjonction avec le boîtier local de conditionnement des signaux. Le logiciel actuel écrit en langage ASYST sera modifié pour communiquer avec le nouveau système. Des menus de configuration de l'essai et des modules de traitement de données seront ajoutés au programme en vue d'améliorer l'interface usager et la rapidité des cycles d'essais.

Nous prévoyons de remplacer le disjoncteur motorisé par un interrupteur à boîtier moulé. Cet interrupteur tripolaire possède une bobine de déclenchement rapide (18 ms) et une commande O/F par un solénoïde (85 ms) remplaçant avantageusement une commande motorisée. Son pouvoir de coupure de 25 kA à 600 V dépasse avec une bonne marge la capacité en court-circuit de notre alternateur (8 kA). Le circuit d'essai sera directement alimenté par cet interrupteur rendant inutile le contacteur d'alimentation que nous recyclerons en contacteur de court-circuit. Cette substitution permettra de surpasser le courant de fermeture maximal actuel de 2 kA. L'interrupteur à solénoïde donnera la possibilité de programmer un essai avec des réenclenchements rapprochés que la configuration actuelle du circuit ne permet pas. Cette fonction est au cœur de la mesure directe du temps de recouvrement du limiteur qui devra se conformer aux exigences d'un réenclencheur de réseau de distribution, soit environ 2 s.

4. ESSAI DE PROTOTYPES DE LIMITEUR DE COURANT

Ce chapitre présente les résultats d'essais des prototypes HQ#6 et HQ#10. Le changement d'état du matériau supraconducteur et les performances du prototype sont discutés à partir des mesures. Enfin, nous citons quelques améliorations à apporter aux méthodes de test.

4.1 Résultat des essais du prototype HQ#6

Le prototype HQ#6 a été conçu, assemblé et testé au laboratoire de supraconductivité de l'IREQ à Varennes au dernier trimestre 1995. Il a fonctionné à 77 K, plongé dans un cryostat rempli d'azote liquide. Il a été construit avec des pièces massives de Bi-2212 ($J_c \sim 1 \text{ kA/cm}^2$) fabriquées selon un procédé de fusion-moulage par Hoechst [13]. Il a été testé à courant efficace nominal constant de 95A en augmentant progressivement la tension à partir de 200 V. Les figures 4.1 à 4.3 montrent les résultats de ces essais, publiés en [14]⁷.

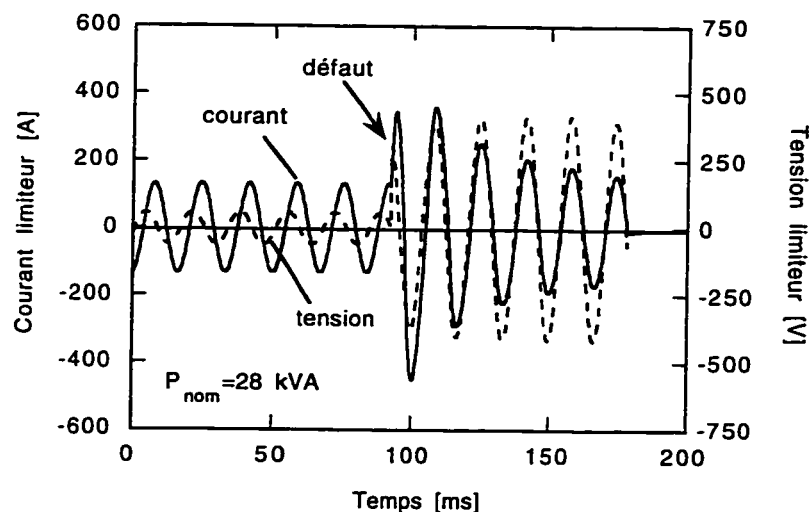


Figure 4.1: Essai du prototype HQ#6 à $V_{nom}=300 \text{ V}$ et $I_{nom}=95 \text{ A}$.

⁷ [14] est reproduite intégralement en annexe I

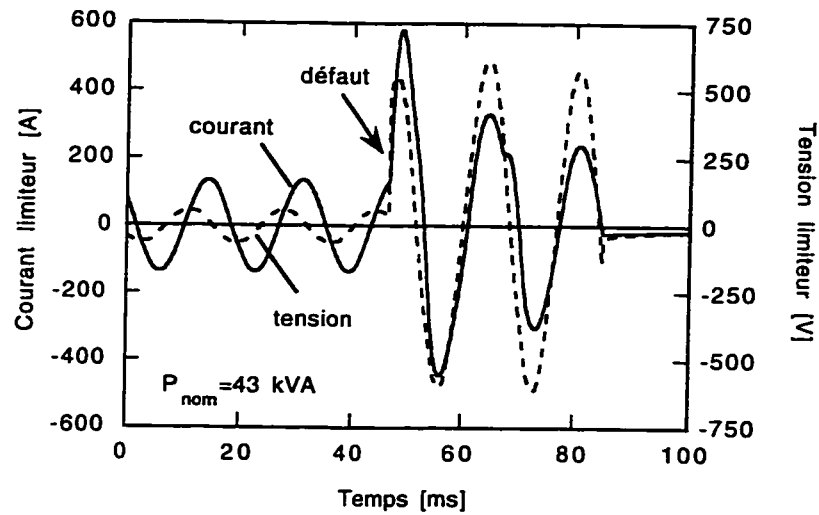


Figure 4.2: Essai du prototype HQ#6 à $V_{nom}=450\text{ V}$ et $I_{nom}=95\text{ A}$.

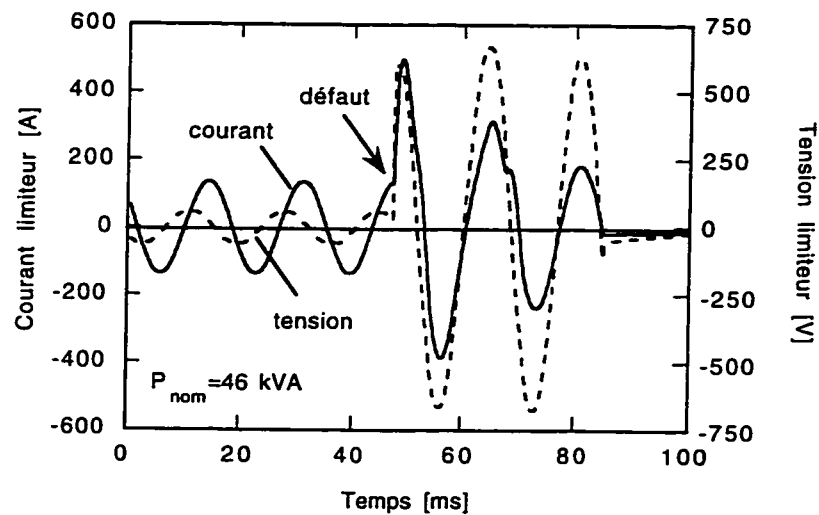


Figure 4.3: Essai du prototype HQ#6 à $V_{nom}=490\text{ V}$ et $I_{nom}=95\text{ A}$.

Les essais ont été effectués successivement aux tensions de 300V, 450V et 490V à l'aide d'une batterie d'autotransformateurs monophasés 0-600V/200A. Le supraconducteur a cassé lors du dernier essai à 46kVA. Les courbes montrent qu'à chaque fois la limitation s'effectue dans le premier quart de cycle à moins de 4 fois la valeur crête du courant nominal. On

remarque aussi la décroissance subséquente d'amplitude du courant limité pendant le maintien du défaut qui s'explique par l'échauffement du supraconducteur. La limitation de courant à l'instant de l'établissement du défaut provient de la caractéristique VI du supraconducteur à une température proche de 77 K. L'excursion du point de fonctionnement au-delà du coude de cette caractéristique introduit une résistance qui prend effet instantanément et s'accompagne d'une dissipation de chaleur dans le supraconducteur. Par la suite, cette caractéristique VI évolue avec l'échauffement et voit sa transition s'effectuer pour des courants critiques de plus en plus faibles. La diminution du courant critique avec l'élévation de température résulte en une limitation plus sévère car la résistance effective du supraconducteur (R_{sc}) augmente. Ce phénomène démontre la nature essentiellement résistive de la limitation même si le limiteur fonctionne par couplage inductif.

En régime nominal, la tension aux bornes du limiteur provient de l'impédance de fuite que nous avons négligée dans le modèle simplifié du chapitre 2. Cette impédance de fuite principalement inductive provient de l'espace magnétisé qui sépare le primaire de l'anneau supraconducteur. La résistance du primaire en cuivre et le flux de fuite atteignant le noyau, à cause du blindage imparfait du supraconducteur, contribuent aux pertes en régime nominal. Le régime de défaut libère sur 38 ms une énergie de 3,6 kJ qui doit être évacuée dans l'azote liquide afin de réduire le temps de recouvrement après une opération du limiteur.

Les mécanismes électromagnétiques et ses interactions avec le matériau, responsables de la saturation des supercourants et du passage à l'état résistif, font que la transition s'effectue de façon non-uniforme. Certaines régions deviennent résistives alors que d'autres demeurent supraconductrices. Ce processus est responsable de la formation de zones à haute densité d'énergie par unité de volume. Ces zones subissent un échauffement rapide entraînant des contraintes thermo-mécaniques pouvant conduire à la rupture du matériau supraconducteur

[15]. L'hétérogénéité intrinsèque du Bi-2212, ainsi que les imperfections issues de sa fabrication favorisent la création de points chauds. Pour compenser cette déficience du matériau, le Bi-2212 utilisé dans le prototype HQ#6 a été renforcé avec de l'acier inoxydable. Ce renforcement applique une précontrainte de compression qui améliore la résistance mécanique du supraconducteur face aux efforts qu'il subit durant une opération.

4.2 Résultat des essais du prototype HQ#10

Le prototype de limiteur de courant HQ#10 a été assemblé et testé au laboratoire de supraconductivité de l'IREQ à Varennes entre novembre 96 et mars 97. Nous l'avons maintenu dans l'azote liquide à l'aide d'un cryostat muni d'un réfrigérateur cryogénique. Le réfrigérateur a permis un fonctionnement à des températures comprises entre 65 K et 77 K. Le prototype a été construit avec des anneaux de Bi-2212 manufacturés par Hoechst [13]. Nous l'avons testé à courant nominal de 174 A à 588 V avec le circuit d'essai dans sa version finale, décrite au chapitre 3. Les résultats sont montrés à la figure 4.4.

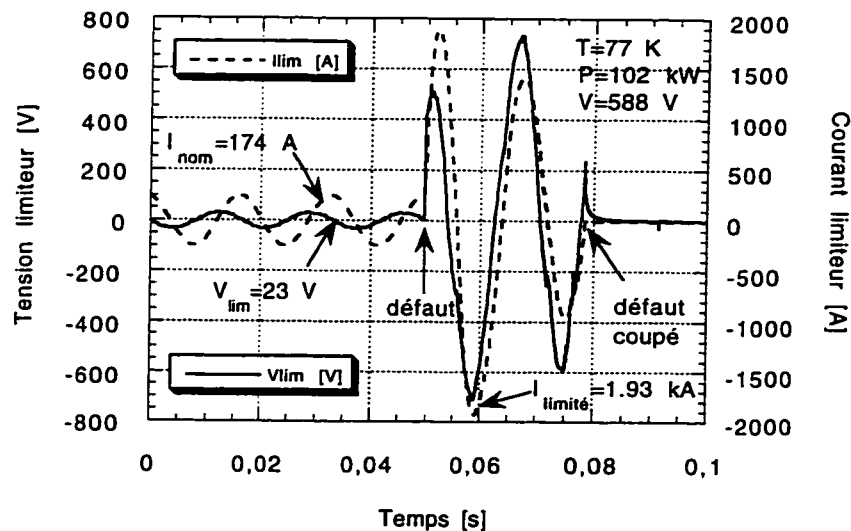


Figure 4.4: Essai à 100 kVA et 600 V du prototype HQ#10.

La première crête du court-circuit est limitée à environ 8 fois le courant de crête nominal suivie d'une décroissance liée à l'échauffement. Le limiteur HQ#10 possède des anneaux de contrôle en cuivre au secondaire qui ajoutent une contribution notable au courant de court-circuit.

Ici encore, l'impédance de fuite engendre une chute de tension en régime nominal. Les pertes qui révèlent un facteur de puissance de 0,16 s'élèvent à 640 W. Elles proviennent principalement du primaire en cuivre et du supraconducteur. De cet essai, nous avons extrait la figure 4.5 qui présente les courbes de puissance et d'énergie dissipée dans le limiteur.

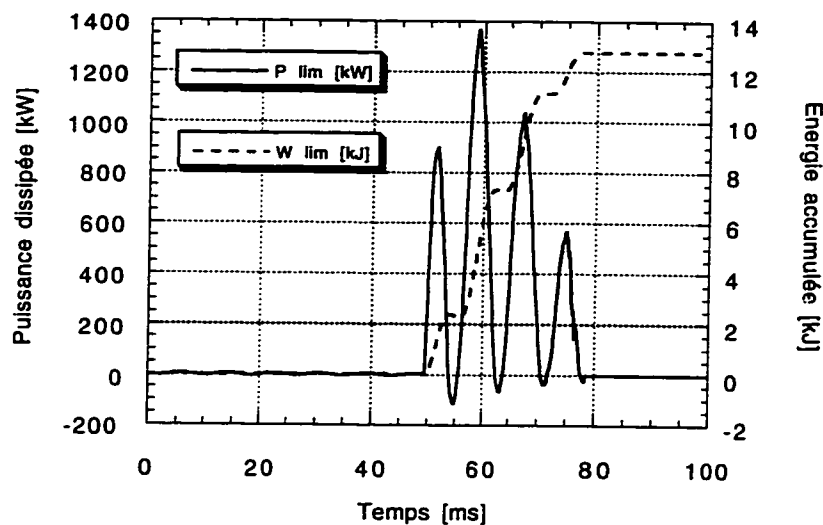


Figure 4.5: Puissance et énergie dissipée dans l'essai à 100 kVA de HQ#10.

Le court-circuit de la charge provoque la transition à l'état résistif du supraconducteur. Le limiteur atteint une puissance crête de 1,35 MW. Le court-circuit d'une durée de 29 ms libère 12,7 kJ de chaleur répartie dans le supraconducteur, les anneaux de contrôles et le fer. Le renforcement du supraconducteur permet de mieux gérer la formation de zones chaudes et de faciliter ainsi l'impact des contraintes thermo-mécaniques du défaut sur le matériau. La figure 4.6 montre la courbe instantanée de l'énergie accumulée et du I^2t de l'essai.

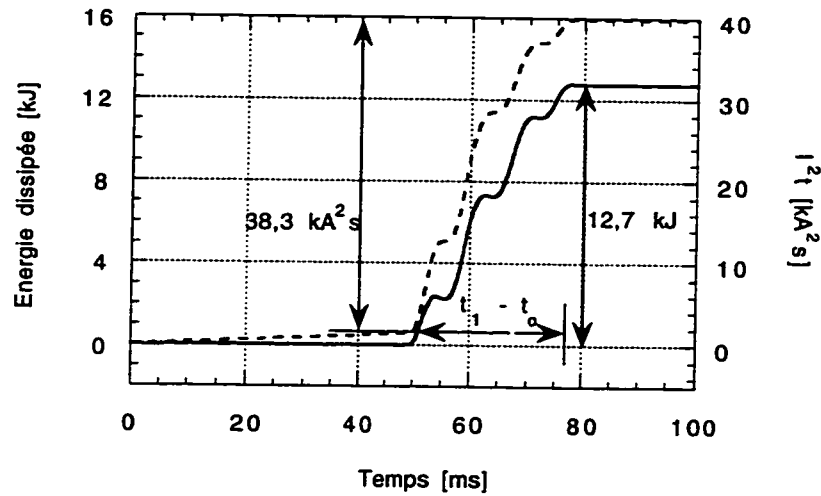


Figure 4.6: Energie et I^2t de l'essai à 100 kVA de HQ#10.

On extrait le courant efficace de limitation I_l , d'après le cumul du I^2t du limiteur sur la période du défaut. Ce courant calculé, selon les équations qui suivent, est représentatif du niveau efficace de courant de court-circuit que le limiteur de courant laisse passer.

$$I_l = \sqrt{\frac{1}{(t_1 - t_0)} \int_{t_0}^{t_1} (i_{lim})^2 dt} \quad \text{valeur efficace du courant de limitation}$$

$$I^2t = \int_{t_0}^{t_1} (i_{lim})^2 dt = 38,3 \text{ kA}^2\text{s} \quad I^2t \text{ du court-circuit limité}$$

$$I_l = \sqrt{\frac{I^2t}{(t_1 - t_0)}} = \sqrt{\frac{38300}{(0,029)}} = 1150 \text{ A} \quad \text{courant efficace de limitation}$$

Le tableau 4.2 récapitule l'ensemble des indices de performance extraits des essais à 46 kVA et à 100 kVA respectivement pour les prototypes HQ#6 et HQ#10.

Tableau 4.1: Résultats des essais de HQ#6 et de HQ#10.

Paramètres	Définitions	HQ #6	HQ #10
V_{nom}	Tension nominale de la ligne	490 V	588 V
V_{lim}	Tension efficace du limiteur	42 V	23 V
I_{nom}	Courant nominal de la ligne	95 A	174 A
$P_{nom} = V_{nom} I_{nom}$	Puissance nominale du limiteur	46 kVA	102 kVA
$P_{loss} = V_{lim} I_{nom} \cos\phi$	Pertes en régime nominal	1,22 kW	0,64 kW
$\delta = V_{lim}/V_{nom}$	Indice de chute de tension	8,6 %	3,9 %
$\gamma = P_{loss}/P_{nom}$	Indice des pertes	2,7 %	1,1 %
τ_a	Temps de réponse	<1/4 cycle	<1/4 cycle
v_p	Tension crête induite au limiteur	693 V	832 V
i_{pul}	Courant crête de défaut non-limité	5 kA	8 kA
i_p	Courant crête de limitation	497 A	1,93 kA
$\eta_0 = i_p/(I_{nom} \times \sqrt{2})$	Indice crête de surintensité	3,68	7,84
I_l	Courant efficace de limitation	231 A	1152 A
$\eta_1 = i_{pul}/i_p$	Indice crête de limitation	14	4
$\eta_2 = I_u/I_l$	Indice efficace de limitation	22	6
$I^2t = \int (i_{lim})^2 dt$	I^2t de la durée du défaut	2,0 kA ² s	38,3 kA ² s
$E_{lim} = \int (v_{lim} i_{lim}) dt$	Energie du limiteur lors du défaut	3,58 kJ	12,7 kJ
τ_r	Temps de recouvrement	non-évalué	non-évalué

Bien qu'il y ait un progrès notable des performances avec le dernier prototype, les pertes sont encore trop élevées. Elles nuisent à la stabilité thermique du supraconducteur et sont décuplées dans le cryoréfrigérateur dont l'efficacité énergétique à 77 K se situe autour de 1/30.

4.3 Effets de l'alternateur sur les résultats d'essais

Lors du court-circuit de la charge, le déséquilibre entraîne une séquence inverse de courant statorique qui induit sur la roue polaire une ondulation de champ à fréquence double (120 Hz). Chaque pôle est muni d'un enroulement amortisseur dont le rôle est d'offrir une dérivation de faible impédance à ces courants afin d'atténuer la distorsion harmonique de tension qu'ils

engendrent. Une machine synchrone triphasée est normalement dotée d'amortisseurs conçus pour absorber un déséquilibre permanent de 10 % de sa puissance nominale. Dans le cas d'un essai en court-circuit à 600 kW, nous atteignons 80 % de déséquilibre sur la phase C, introduisant ainsi une forte distorsion harmonique qui se manifeste par une allure triangulaire plutôt que sinusoïdale de la tension. La figure 4.7 montre un signal provenant de la tension alternateur pendant un défaut. L'amplitude de la tension ainsi que sa fréquence variant tout au long du défaut, nous avons manipulé les données pour obtenir un échantillon alternatif de fréquence stable. Le signal a été obtenu par juxtaposition symétrique d'une demi-alternance. Le résultat est une onde parfaitement symétrique de valeur moyenne nulle. Cet échantillon a servi à déterminer le contenu harmonique de la tension alternateur pendant un défaut à l'aide d'un programme d'analyse⁸ écrit pour MATLAB.

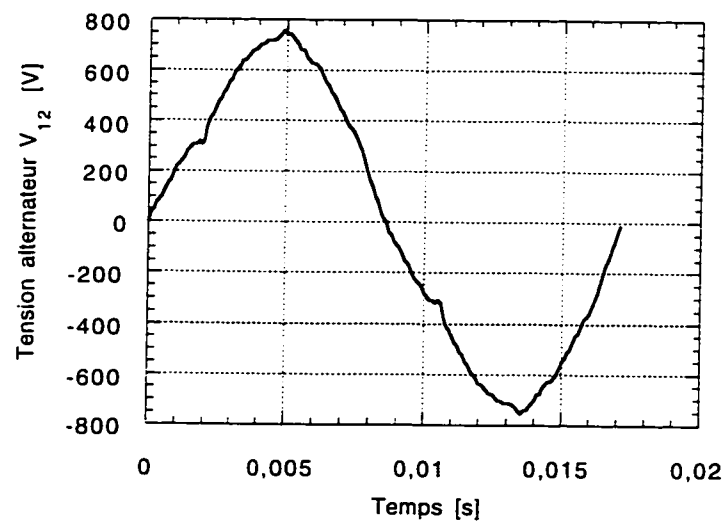


Figure 4.7: Échantillon de la tension alternateur durant un défaut.

Le programme d'analyse utilise un algorithme de FFT qui extrait tous les harmoniques complexes jusqu'à la fréquence de Nyquist qui vaut ici 5 kHz. Une transformation est

⁸ Le listing du programme est fourni en annexe V.

nécessaire pour ramener le spectre à celui des fréquences positives, dont on extrait l'amplitude et la phase de chaque harmonique. La figure 4.8 présente une partie des harmoniques ainsi que la reconstitution approximée à l'harmonique 7 du signal temporel.

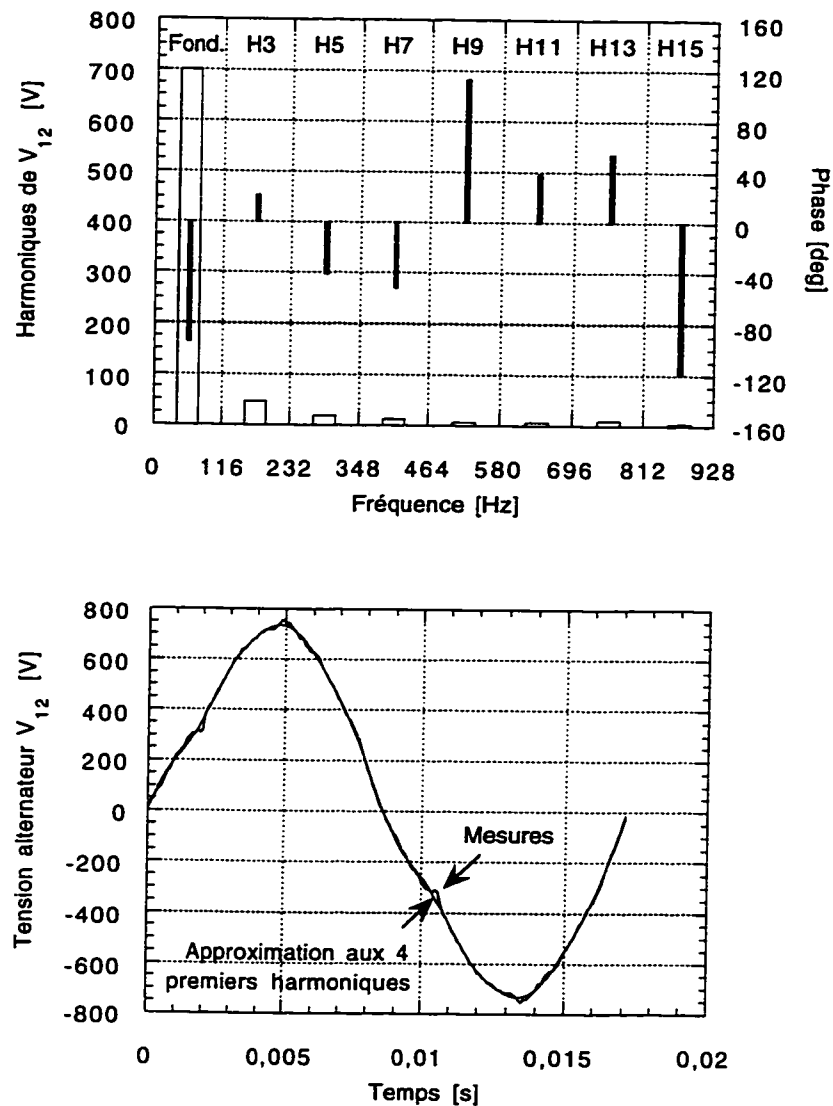


Figure 4.8: Reconstitution du signal par la somme partielle de ses harmoniques.

En définitive, les effets de l'alternateur influencent peu la puissance libérée lors du défaut, ce qui recoupe les conclusions de [16] concernant le test normalisé de fusible limiteur de courant.

4.4 Amélioration des techniques d'essai

Nous avons tenté d'estimer le temps de recouvrement du limiteur par une mesure en 4 points de son impédance. Son principe consiste à injecter un faible courant alternatif (10 mA/60 Hz) et d'en mesurer la tension efficace qu'il engendre afin d'en déduire l'impédance. Cette technique nous a posé plusieurs difficultés. Premièrement, la faible amplitude du courant et de l'impédance du limiteur place cette mesure dans la gamme des millivolts c.a alors que le limiteur reçoit 600 V à ses bornes pendant un court-circuit. En conséquence, il a fallu adapter un dispositif synchrone d'isolation de la mesure de tension (± 50 mV) pendant le court-circuit de la charge. Deuxièmement, au moment de l'ouverture du disjoncteur, des courant persistants dans le supraconducteur produisent une tension transitoire superposée à la mesure en ca. Là encore, nous avons dû remplacer le voltmètre ca par un oscilloscope pour visualiser les deux composantes. Finalement, cette mesure indirecte du temps de recouvrement par la mesure de l'impédance dynamique du limiteur est laborieuse et imprécise. Le dispositif, dans sa première version, a tout de même apporté une indication précieuse de l'impédance statique du limiteur, prouvant le bon état du supraconducteur.

Dans un avenir proche, la mesure du recouvrement se fera par une méthode directe basée sur une séquence de réenclenchement du disjoncteur (par exemple: O-2s-FO-10s-FO-20s-FO). Cette approche soumettant le limiteur de courant à un cyclage thermique mettra en évidence la capacité réelle du limiteur à soutenir des défauts successifs dans un court intervalle de temps.

CONCLUSION

Nous avons construit un banc d'essai de limiteur de courant de défaut afin de recréer à échelle réduite les régimes permanents et de court-circuit d'une ligne de distribution. Pour cela, nous avons installé une source à fort courant reliée à un ensemble de disjoncteur et de contacteurs permettant d'alimenter et de mettre en court-circuit une charge de 100 kW à 600 V. Un échelon transitoire de charge à 600 kW, simulant les effets d'un court-circuit limité, a servi à valider le fonctionnement de l'ensemble du banc d'essai, notamment celui du groupe moteur-alternateur.

Les résultats de l'évaluation de prototypes à l'aide de notre banc d'essai ont démontré l'efficacité des supraconducteurs dans la limitation de courant par impédance dynamique. Les essais ont prouvé que la limitation est immédiate puis augmente jusqu'à l'ouverture du disjoncteur. Enfin, nous avons identifié la nécessité de renforcer le supraconducteur et d'éviter une trop grande concentration de chaleur dans le supraconducteur. Les futures conceptions viseront à réduire les pertes et à améliorer le transfert de chaleur vers l'azote liquide.

Le circuit d'essai recevra un nouveau système d'acquisition de donnée ainsi qu'un disjoncteur adapté aux défauts avec réenclenchement multiples. La phase II du partenariat prévoit la mise au point d'un prototype pleine échelle dont la cible est la protection des lignes de distribution de 600 A à 25 kV. Dans ce contexte certains sous-ensembles tels que les amenées de courant et les éléments modulaires supraconducteurs seront testés sur notre banc d'essai.

RÉFÉRENCES

- [1] WILDI, T. (1991). Electrotechnique, Deuxième édition, Les Presses de l'Université Laval, 908 pages.
- [2] BRETON, R., TESSIER, J., GOYETTE, A. (1996). Relais et protection, Notes du cours ELE6410 de l'École Polytechnique de Montréal.
- [3] LANDRY, M. (1995). Appareils de commutation dans les postes à haute tension, Notes du cours ELE6408 de l'École Polytechnique de Montréal, Vol.1, 115 pages.
- [4] CARE, J.M., MAYAKI, F. (1995). Fault Current Criteria, Canadian Electricity Association 079 D821, 100 pages.
- [5] SLADE, P.G., VASHALL, R.E., WU, J.L., STACEY, E.J., STUBLER, W.F. and TALVACCHIO, J. (1990). Study of Fault-Current-Limiting Techniques, Final Report, EL-6903, EPRI Research Project 2877-1.
- [6] NEWHOUSE, V.L. (1964). Applied Superconductivity, published by John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A., 285 pages.
- [7] ONNES, H.K. (1913). Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, Hollande, Suppl. No. 34.
- [8] NAKAHARA, T. (1993). Review of Japanese R&D on Superconductivity, Applied Superconductivity, Vol.1, Nos 3-6, 177-189.
- [9] RIES, G., GROMOLL, B., NEUMÜLLER, H.W., SCHMIDT, W., KRÄMER, H.P. and FISHER, S. (1995). Development of Resistive HTSC Fault Current Limiters, Inst. Phys. Conf. ser. No.148, présenté à EUCAS'95, 635-638.
- [10] CAVE, J.R., WILLÉN, D.W.A., ZHU, W. and ROBERGE, R. (1994). Superconducting Fault Current Limiter Development for Medium Voltage Power Network Application, Présenté au 1^{er} Atelier canadien de supraconductivité appliquée, Ottawa, ON, Canada.

- [11] FLEISHMAN, L.S., BASHKIROV, Y.A., ARESTEANU, V.A., BRISSETTE, Y. and CAVE, J.R. (1993). Design Considerations for an Inductive High-Tc Superconducting Fault Current Limiter, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 3, 570-573.
- [12] BRISSETTE, Y., ST-JEAN, G., NADI, R., CAVE, J.R., BALTZER, E., GROMOLL, B., POVH, D. (1997). General Characteristics of Superconducting Fault Current Limiters for Power Distribution Systems, sera soumis pour publication à IEEE Power Engineering Society.
- [13] HOECHST Aktiengesellschaft Corporate Research D-65926 Frankfurt, Allemagne.
- [14] CAVE, J.R., WILLÉN, D.W.A., NADI, R., ZHU, W., PAQUETTE, A., BOIVIN, R. and BRISSETTE, Y. (1996) Testing and Modelling of Inductive Superconducting Fault Current Limiters, présenté à ASC'96 à Pittsburgh, PA (MVA-3), USA.
- [15] ZHU, W., WILLÉN, D.W.A., NADI, R. et CAVE, J.R. (1996). Failure Analysis in a 43kVA Class Fault Current Limiter, Présenté au 2^{ème} Atelier canadien de supraconductivité appliquée, Ottawa, ON, Canada.
- [16] ADNAN, M. (1991). Short-Circuit Testing of Current-Limiting Devices--Influence of Method of Connecting the Synchronous Generator, M.Sc. Dissertation, University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST), Manchester, U.K, 112 pages.

**ANNEXE I: ARTICLE SUR LE TEST ET LA
MODÉLISATION DU PROTOTYPE HQ#6:**

Testing and Modelling of Inductive Superconducting Fault Current Limiters

J. R. Cave, D. W. A. Willén, R. Nadi[†], W. Zhu, A. Paquette, R. Boivin and Y. Brissette

VPTI Hydro-Québec, 1800 boul. Lionel-Boulet, Varennes, Québec, Canada J3X 1S1

[†]École Polytechnique, Montréal, Québec, Canada H3C 3A7

Testing and Modelling of Inductive Superconducting Fault Current Limiters

J. R. Cave, D. W. A. Willén, R. Nadi[†], W. Zhu, A. Paquette, R. Boivin and Y. Brissette

VPTI Hydro-Québec, 1800 boul. Lionel-Boulet, Varennes, Québec, Canada J3X 1S1

[†] Ecole Polytechnique, Montréal, Québec, Canada H3C 3A7

Abstract— Fault current limiters are expected to be amongst the first applications of high temperature superconductors in power engineering. The use of the intrinsic property of a superconductor to transit from a zero (or near zero in the case of AC currents) resistance state to a highly resistive state when the critical current is exceeded is the basis for a fast acting fault current limiter. In this article we report test results (43kVA nominal power: 450V rms and 95A rms) and comparisons to theoretical simulations. Circuit analysis is used to study design issues and to extract the superconducting material's (BSCCO 2212) properties during the application of the short circuit. EMTP simulation is employed to predict fault current limiter behaviour in the utility network in order to co-ordinate with other equipment.

I. INTRODUCTION

The Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) is a promising new application for High-Temperature Superconductors (HTS). A first application for power networks could be in substations at each feeder line. Simulations show that power quality is greatly improved due to the lower fault currents that in turn limit sags on other feeders connected to the 230/25kV power transformer. In addition, the stresses on other equipment (transformers, circuit breakers, collecting bars, etc.) are greatly reduced, and this prolongs the useful life of the equipment. Within the context of our collaboration project with Siemens we are studying inductive concepts for fault current limiters [1-4] whilst they are developing a resistive concept [5].

II. EXPERIMENTAL

The physical principle of the limiter and the equivalent engineering circuit are shown schematically in Fig. 1. The reduced scale limiter prototype HQ#6 using Hoechst Bi-2212 melt cast material [6] operating at 77K (critical current density: $J_c \sim 1 \text{ kA/cm}^2$) has been tested in a circuit (Fig. 2) comprising of a breaker, a voltage source, a supply contactor, a 100kW load and a short-circuit make switch. The test sequencing is controlled by a delay generator, while a four channel differential scope acquires the data.

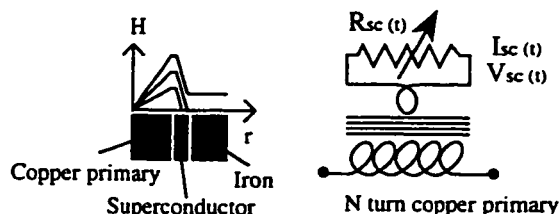


Fig. 1. Schematic of the limiter principle and engineering equivalent circuit

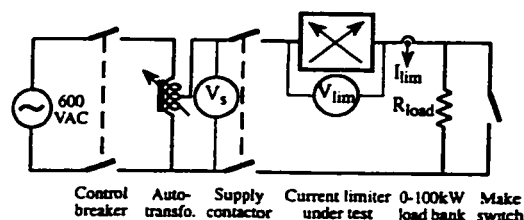


Fig. 2. Schematic of the limiter test circuit

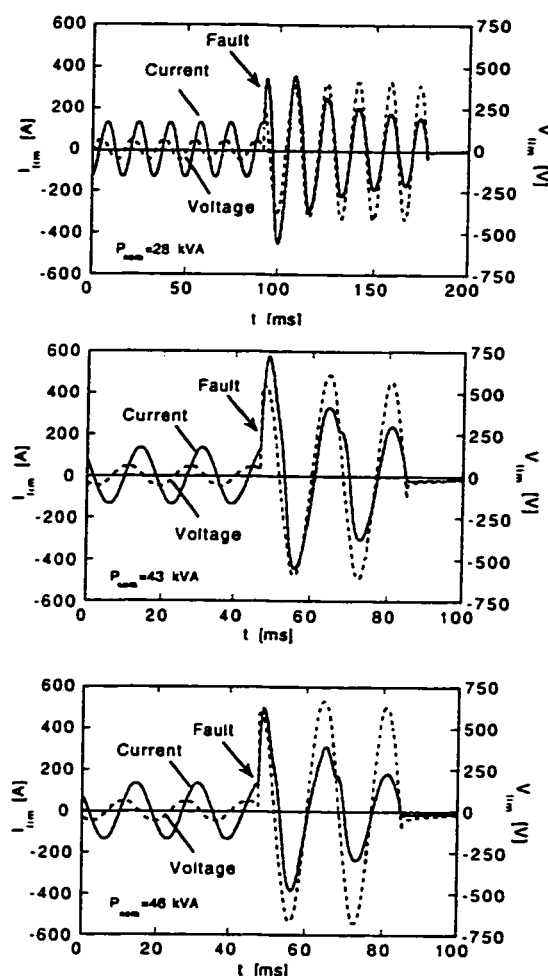


Fig. 3. Current and voltage traces for short-circuit tests performed at nominal powers of 28kVA, 43kVA, 46kVA (superconductor failed) from top to bottom respectively with corresponding voltages of 300V, 450V, and 490V

To create a short-circuit, the make switch is closed, so that the full voltage of the source is applied across the limiter. After several cycles the breaker is triggered open. This allows the limiter to recover to its initial state.

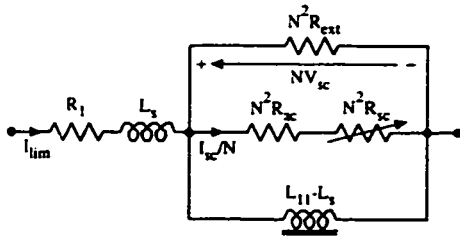
Such sequences were performed at a nominal current of 95A and at increasing voltages, starting at 200V (all values in rms). Fig. 3 shows the current and voltage traces for tests performed at 300V, 450V, and 490V (nominal powers of 28, 43, and 46kVA respectively). In each case the limited peak fault current is approximately four times the nominal current, and is obtained in the first half-cycle. During the 46 kVA test the superconductor failed. This is discussed in detail in section V.

III. EQUIVALENT CIRCUIT ANALYSIS

In order to appreciate the behaviour of the superconductor, a detailed analysis is performed on the 300V (28kVA) fault, where the absence of core saturation observed at $t=68$ ms for voltages above 400V simplifies the calculations.

The V-I curve of the limiter itself does not clearly display the behaviour of the superconductor [3]. However, when an equivalent circuit analysis [7,8] is applied, see Fig. 4, the time-resolved voltage (V_{sc}) and current (I_{sc}) of the superconductor can be extracted from the experimental data. The result of these calculations for the superconductor is shown in Fig. 5a. At this reduced power, the peak current in the superconductor is ~ 30 kA at an applied peak voltage of just above 4V. The instantaneous value of the superconductor resistance and the dissipated energy are shown in Fig. 5b. This analysis shows that as the fault progresses, so does the cumulative dissipated energy and the resistance of the superconducting element.

The limitation of the first peak of the fault current is due to the intrinsic V-I curve of the superconductor at temperatures near to that of liquid nitrogen. Subsequent peaks are limited by the evolution of these curves as the superconductor's temperature rises. This behaviour underlines the essentially resistive nature of the limitation even though the superconductor is coupled inductively through transformer action to the line.



$$V_{sc} = [V_{lim} - I_{lim}R_1 - L_1(dI_{lim}/dt)] / N$$

$$I_{sc} = N [I_{lim} - \int NV_{sc} / (L_{11} - L_2) dt - V_{sc} / (NR_{ext})]$$

Fig. 4. Equivalent circuit for limiter analysis (adapted from [7])

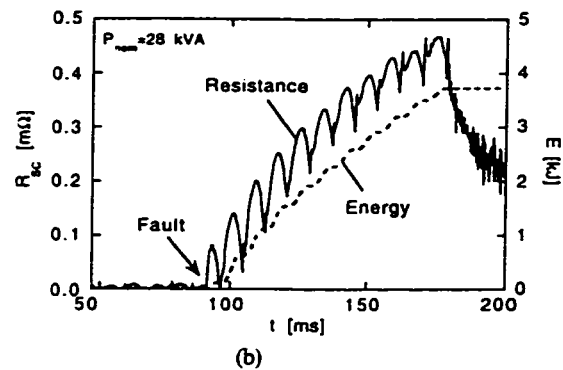
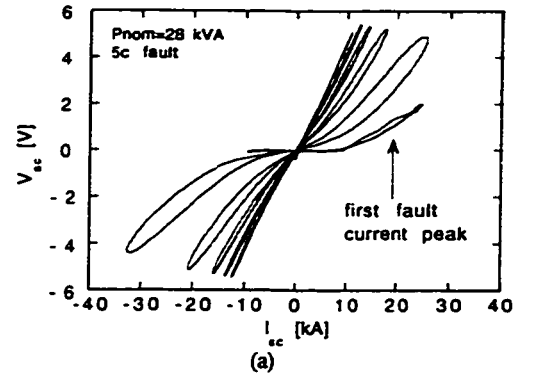


Fig. 5. (a) Current and voltage in the superconductor during a short-circuit fault at 28kVA. (b) Resistance versus time of the superconductor element and the energy dissipated during the fault calculated from the data in (a)

IV. EMTP MODELLING

For 25kV distribution lines, the fault current amplitudes are normally in the range of 12kA to 31kA [9] if no limitation apparatus is added. By installing a superconducting FCL, fault current amplitudes can be limited to 4kA, or lower if needed, without impairing power quality or adding important losses. The unit will in fact improve power quality (by reducing sags) and protect substation equipment against undue stress during a fault [10,11].

From the 28kVA FCL tests results and parameters associated with the FCL design, we have generated a EMTP model that is capable of reproducing the test results. Fig. 6 shows the test circuit and the model used for different simulations.

Fig. 7 shows the method used to model the superconducting element. A V-I module is used for the fast resistive transition of the superconducting material and then an R(t) module simulates the gradual heating effect. In comparison with Fig. 5 of the experimental section, here we are averaging the instantaneous variation of resistance after the first resistance peak.

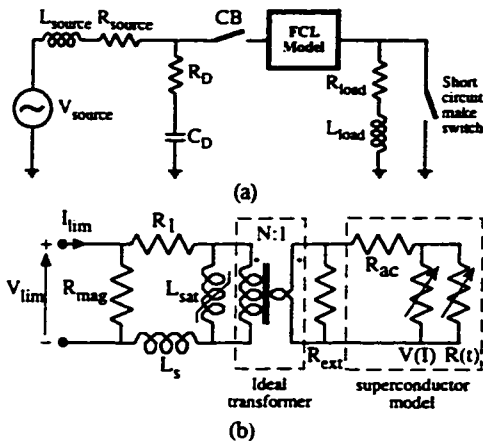


Fig. 6. (a) EMTD test circuit (b) FCL model

Fig. 8 shows a comparison between the 28kVA test results and the simulation. Other simulations for faults occurring at different phase angles within a cycle have also been performed.

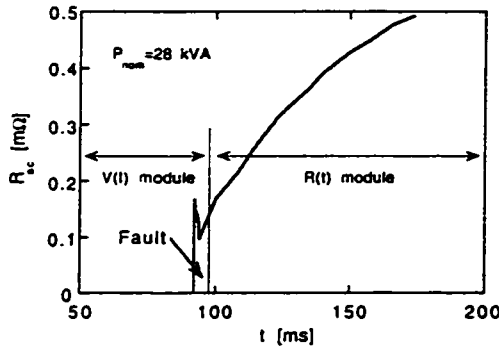


Fig. 7. Modelling of the superconductor resistance is decomposed into two modules: first peak-V(t) module, subsequent peaks-R(t) module

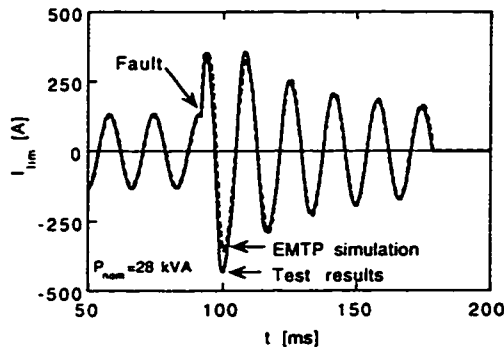


Fig. 8. Comparison of EMTD simulation with experimental results

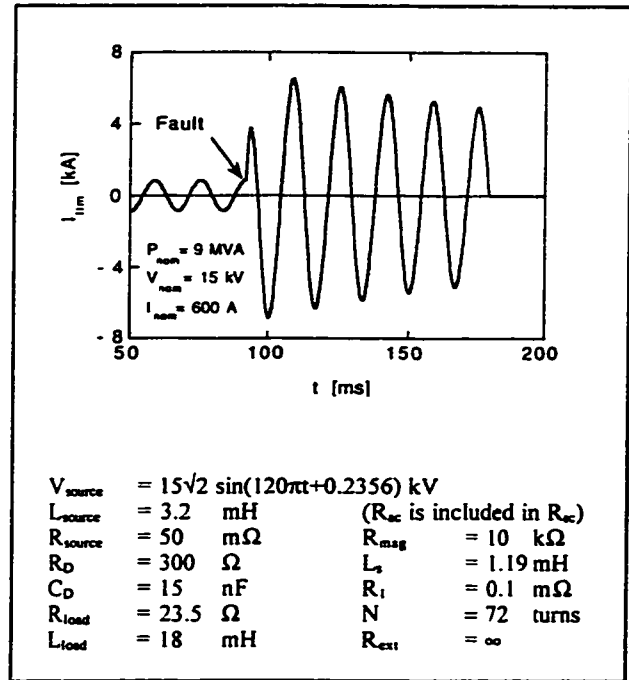


Fig. 9. Example of a scaled-up FCL operating at 15kV which represents one phase of a 25kV 3 phase feeder (associated model parameters, Fig. 6)

Based on previous simulation, we have scaled-up the FCL model for a single phase 15kV, 600A distribution limiter. In this case we take the same R_{sc} as in Fig. 7. However, as the voltage and current are higher then the volume of superconductor will also be higher. An optimized design with higher values of J_c and ρ_{sc} will be necessary to reduce this volume.

Fig. 9 shows a 15kV simulation in a realistic circuit that represents a feeder located at the substation near the transformer. Since the current is limited to about 4000A, other feeders will not undergo a voltage sag caused by the fault, thus improving power quality.

V. MATERIAL THERMO-MECHANICAL MODELLING

After testing at 46kVA limiter prototype HQ#6 failed due to overheating in the superconducting material.

Thermal stresses developed on the interface of "hot zones" and "cold zones" in the superconductor during the test are considered to be the major contribution to the failure [12]. Defects in the materials decrease the J_c locally, thus creating potential hot zones. After nucleation of a hot zone, current is forced to pass through nearby areas, driving the material there into a resistive state, resulting in growth of the hot zone, and finally, the failure of the material. Fig. 10 shows SEM micrographs of (a) local melting observed along a crack, and (b) amorphous-looking phase on a fracture surface.

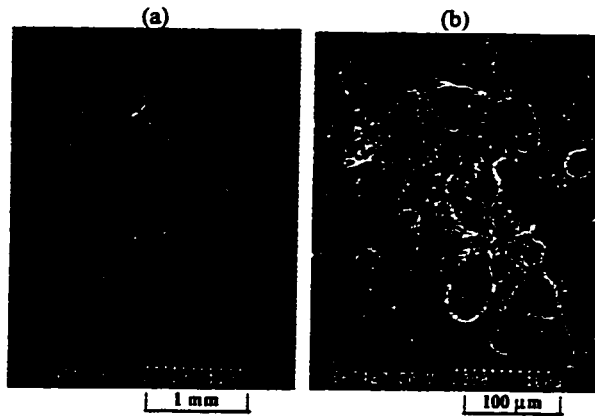


Fig. 10. Cracks on the Bi-2212 material surface: (a) local melting and explosion craters along a crack; (b) amorphous phases observed on a fracture surface, with voids and cracks

Inhomogeneous temperature distributions introduce thermal stresses in the materials. Assuming that the hot zone is spherical, the stresses induced at the interfaces of hot and cold zones can be calculated as [13]

$$\sigma_{rr} = -2\sigma_{\theta\theta} = -2\sigma_{\phi\phi} = -\frac{2E\alpha\Delta T a^3}{3(1-\nu)r^3}$$

where σ_r is the compressive stress in radial direction, $\sigma_{\theta\theta}$ and $\sigma_{\phi\phi}$ are the tensile stresses on the surface of the sphere, a is radius of the sphere, r is the distance to the centre of the sphere, E (41 GPa [14]) is Young's modulus, ν (assume 0.2) is Poisson's ratio and α is the thermal expansion coefficient [15]; $\sigma_{\theta\theta}$ and $\sigma_{\phi\phi}$ are plotted in Fig. 11. When $\Delta T > 200\text{K}$, the stresses exceed the strength of the Bi-2212, (35MPa [16]) and result in failure. Thus, hot zones and their relation to microstructural homogeneity are very important for limiter applications.

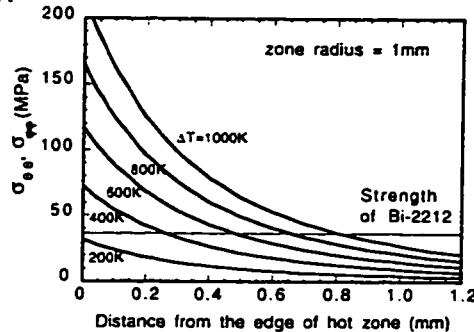


Fig.11. Variation of thermal stresses with temperature and distance from the edge of a spherical hot zone (in this example $a=1\text{mm}$)

VI. CONCLUSIONS

The Superconducting Fault Current Limiter applied to power substations will greatly improve power quality, by reducing sags generated by fault currents, if it is installed on

feeders. Another use will be as ties between transformers. By lowering stress on collecting bars, circuit breakers, reclosers and transformers associated with faults, the SFCL will contribute to longer life expectancy of power substation equipment. Protection co-ordination with other protective devices, i.e. fuses, reclosers, is extremely important and will depend mainly on the chosen limited current of the SFCL.

Simulation studies and experimental tests on inductive prototypes confirm the physical principle, and demonstrate the rapid limitation of the fault current in the first half-cycle.

For this design of superconducting fault current limiter, homogeneity of the material should be improved to ensure reliability. For economical limiters in distribution networks, the J_c and the effective resistivity of bulk materials, such as Bi-2212 operating at 77K need to be increased.

REFERENCES

- [1] L. S. Fleishman, Y. A. Bashkurov, V. A. Aresteanu, Y. Brissette and J. R. Cave "Design Considerations for an Inductive High- T_c Superconducting Fault Current Limiter" *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (1993) 3 p570
- [2] J. R. Cave, D. W. A. Willén, Y. Brissette, C. Richer "Test Results for Laboratory Scale Inductive High- T_c Superconducting Fault Current Limiters" *IEEE Trans. Mag.*, (1994) 30 p1895
- [3] D. W. A. Willén and J. R. Cave "Short Circuit Test Performance of Inductive High T_c Superconducting Fault Current Limiters" *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (1995) 5 p1047
- [4] J. R. Cave, D. W. A. Willén, R. Nadi, W. Zhu and Y. Brissette "Inductive HTS fault current limiter development" *Inst. Phys. Conf. ser. No148* (1995) p623 (EUCAS'95)
- [5] G. Ries, B. Gromoll, H. W. Neumüller, W. Schmidt, H. P. Krämer and S. Fisher "Development of Resistive HTSC Fault Current Limiters" *Inst. Phys. Conf. ser. No148* (1995) p635 (EUCAS'95)
- [6] J. Bock, H. Bestgen, S. Elschner and E. Preisler "Large Shaped Parts of Melt Cast BSCCO for Applications in Electrical Engineering" *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (1993) 3 p1659
- [7] W. Paul, Th. Baumann, J. Rhyner, "Tests of 100kW High- T_c Superconducting Fault Current Limiter" *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (1995) 5 p1059
- [8] V. Meerovich, V. Sokolovsky and J. Bock "Quenching in High- T_c Superconducting Ring" *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, (1995) 5 p22
- [9] M. Care, F. Mayaki "Fault Current Criteria", *Canadian Electricity Association 079 D821*, November (1995), 100 pages
- [10] P.G. Slade, R.E. Vashall, et al "The Utility, Requirements for a Distribution Fault Current Limiter", *IEEE Power Delivery*, Vol. 7, No 2, April (1992), pp 507-515
- [11] K.E. Gray, E. E. Fowler "Superconductive Fault Current Limiter", *EPRI EL-329* Dec (1979)
- [12] J. R. Cave, D. W. A. Willén, R. Nadi, W. Zhu and Y. Brissette "Inductive Superconducting Fault Current Limiter Development" Presented at *ICEC16/ICMC*, May, (1996), Kitakyushu, Japan
- [13] S. Timoshenko and J.N. Goodier, *Theory of Elasticity*, 2nd Ed., McGraw-Hill, (1951)
- [14] C. Fanggao, M. Cankurtaran, G. A. Saunders, D. P. Almond, P. J. Ford and A. Al-Kheffaji "The effects of quenching and lead substitution on the ultrasonic wave velocity and attenuation in bismuth cuprate high T_c superconductors" *Supercond. Sci. Technol.*, (1990) 7 p546
- [15] J. Tenbrink, H. Krauth, "Thermal expansion properties of Bi-2212 in Ag or an Ag-alloy matrix" *Supercond. Sci. Technol.*, (1994) 7 p754.
- [16] Data Sheet provided by Hoechst

**ANNEXE II: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DU GROUPE
MOTEUR-ALTERNATEUR**

Groupe moteur-alternateur d'une puissance nominale de 100 kVA capable de fournir 600 kW en transitoire pour 10 cycles à 600 V/60 Hz.

1 Introduction

Ce groupe sera utilisé pour les tests en régime permanent et transitoire d'équipement de protection de réseau. En régime permanent, le système sera connecté à une ligne triphasée 600 V/200 A/60 Hz et débitera sur un charge monophasée de 100 kW placée entre 2 phases. En régime transitoire, un échelon de charge instantané de 100 kW à 600 kW sera appliqué entre les deux même phases. Le groupe fournira de la puissance grâce à son inertie rotative. L'énergie stockée sera d'au moins 1 MJ correspondant à un moment d'inertie du système d'au moins 56 kg.m².

2 Configuration générale du système

Le système comprend un groupe tournant assemblé sur un châssis rigide et une armoire de commande indépendante. Le groupe tournant utilise un moteur électrique d'entraînement couplé avec un alternateur servant à alimenter notre circuit de test ainsi qu'un volant d'inertie pour atteindre 1 MJ d'énergie stockée. Que le système de base comporte ou non un volant d'inertie, il doit toutefois accepter l'installation d'un volant d'inertie comme une option future. Le groupe tournant sera installé dans un abri extérieur recouvert par une enveloppe insonorisée. L'armoire de contrôle comprenant le démarreur et les protections de base du moteur sera localisée à l'intérieur à côté d'une aire d'essai protégée par une grille de sécurité.

3 Composants du système

- 1 châssis d'acier,
- 1 moteur ca d'entraînement du groupe,
- 1 alternateur ca avec son régulateur intégré de tension fixe à 600 V,
- 1 accouplement supportant le couple de freinage durant le régime transitoire,
- 1 démarreur et contrôle de moteur monté dans un boîtier séparé du groupe tournant.

4 Spécifications électromécaniques

4.1 Le châssis d'acier

- Portera le groupe : moteur+accouplement+alternateur(+volant d'inertie si nécessaire),
- Accepter un volant d'inertie (que se soit dans le système de base ou comme option future).

4.2 Le moteur

- Type asynchrone triphasé à haut rendement (glissement inférieur à 1 %),
- Puissance nominale environ 150 kW à 600 V/60 Hz (ligne disponible:600 V/200 A/60 Hz).

4.3 L'alternateur

- Type synchrone triphasé, double palier,
- Arbre conçu pour l'accouplement et le volant d'inertie (qu'il soit de base ou optionnel),
- Puissance nominale de l'alternateur autour de 750 kVA, 600 kW minimum à 600 V,
- Capacité en régime transitoire:
 - écheion de 100 kW à 600 kW ($f_p = 1$) pouvant être maintenu durant 10 cycles,
- Régulateur de tension fixe à 600V attaché sur la carcasse de l'alternateur.

4.4 Démarreur et contrôle de moteur

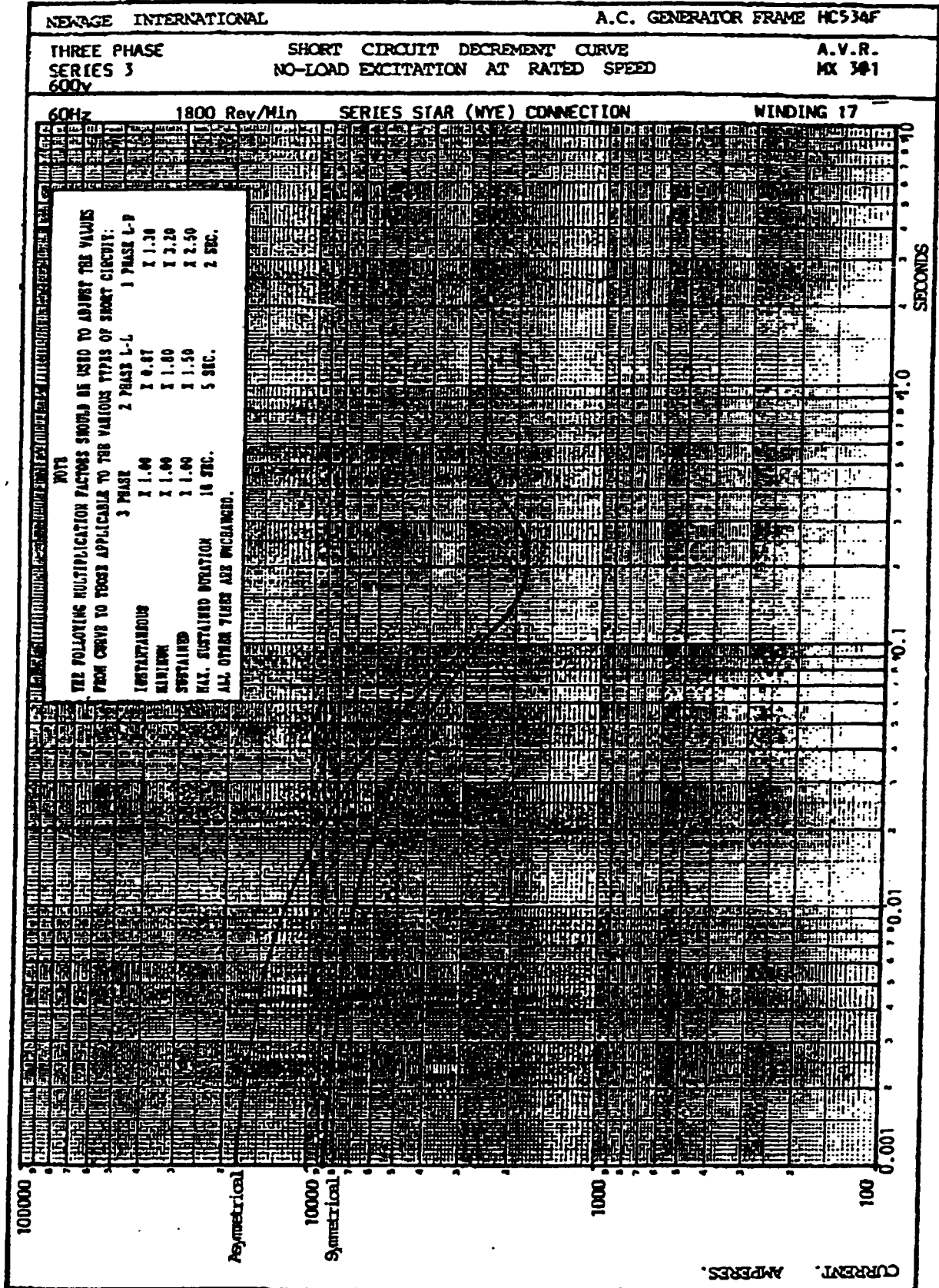
- Type "Soft Start" compatible avec le moteur et la ligne de 600 V/200 A/60 Hz,
- Monté dans un boîtier NEMA 1 renfermant les organes de contrôle suivant:
 - a) disjoncteur sans fusibles type shunt-trip à déclenchement externe,
 - b) monture pour fusibles Forme I, action rapide, classe "J",
 - c) relais de surcharge réglable du moteur,
 - d) transformateur pour alimentation des contrôles,
 - e) boutons poussoirs illuminés : Départ, Arrêt et champignon d'Arrêt Urgence,
 - f) ampèremètre indicateur monté dans la porte avec son transformateur de courant,
 - g) voltmètre indicateur monté dans la porte,
 - h) bornier d'interface recevant la mesure de courant du moteur et la commande du disjoncteur ainsi que tous les signaux nécessaire à un démarrage automatique par une commande externe.

**ANNEXE III: CARACTÉRISTIQUE DE L'ALTERNATEUR EN
COURT-CIRCUIT**

15 JAN. 1997 12:37

NEWAGE FINANCE DEPT 01780 484182

NO.579 P.3/5



ANNEXE IV: FICHE D'UTILISATION DU CIRCUIT D'ESSAI

1 Introduction

Avant toute intervention d'une personne sur le circuit d'essai par exemple pour changer les connexions d'un transformateur ou ajuster la charge, le sectionneur 200 A et le disjoncteur du circuit d'essai doivent être sur OFF. La première étape consiste à choisir la tension et le courant nominal de l'essai. De ces choix, on définit le transformateur à utiliser, son couplage ainsi que la configuration de la charge. Ensuite d'après les rapports d'étalonnage des sondes de mesure et des niveaux présumés des signaux, on choisit les échelles appropriées des instruments. Le reste de la séquence d'essai est pris en charge par le programme LIM.RUN.

2 Couplage des transformateurs

À 600 V aucun transformateur n'est requis, les conducteurs rouge et noir du circuit d'essai sont directement connectés à la sortie du disjoncteur. Serrer les bornes à vis en aluminium du disjoncteur et des transformateurs avec modération.

À 480 V utiliser l'autotransformateur 150 kVA branché entre les phases 1 et 2:

- au primaire: rouge sur H1, noir sur H2, bleu sur H3
- au secondaire: rouge sur X1, noir sur X2, bleu sur X3

À 208 V utiliser le transformateur 75 kVA branché entre les phases 1 et 2:

- au primaire: rouge sur H1, noir sur H2, bleu sur H3
- au secondaire: rouge sur X1, noir sur X2, bleu sur X3

À 115 V utiliser le transformateur 75 kVA branché sur la phase 1:

- au primaire: rouge sur H1, noir sur H2, bleu sur H3
- au secondaire: rouge sur X0, noir sur X1, bleu sur X3

3 Configuration de la charge

La charge est constituée de 44 éléments indépendants de $16,5\Omega$ chacun, pouvant absorber en régime permanent 2,6kW à 208V maximum. Le couplage série et parallèle permet d'ajuster

une résistance sans excéder (dans la mesure du possible) 200 V par élément. À 115 et 208 V on fait une mise en parallèle d'éléments, à 480 et 600 V on place en parallèle des ensembles série de 3 éléments.

4 Les contrôles et l'acquisition de donnée

- Allumer la baie d'instruments, puis après une dizaine de secondes allumer l'ordinateur.
- Sous DOS taper DATE puis TIME pour mettre à jour si nécessaire l'horloge du PC.
- Faire un Restore setup 0 du Keithley 2001 DMM.
- Lancer ASYST en tapant GO4, compiler le programme en tapant LOAD LIM.RUN et exécuter le programme en tapant GO.
- Vérifier que le Stanford DG 535 est au repos et que les interfaces de sortie ne sont pas activées: les DELS du boîtier d'interface doivent être éteintes.

5 Les alimentations du circuit

5.1 L'alimentation de puissance

- S'assurer que le disjoncteur du circuit d'essai est ouvert et fermer le disjoncteur 200 A du tableau principal 600 V du BR-045.
- Mettre sur ON le sectionneur 200 A et placer le commutateur en position basse pour alimenter le circuit par la prise ou en position haute pour utiliser le groupe moteur-générateur.

ATTENTION: L'interrupteur d'isolation du générateur placé derrière la grille doit être sur OFF. Lors d'un essai avec le MG il faut savoir que le 600 V en provenance du générateur est présent dans la fiche 200 A qui devra donc rester enfichée en tout temps.

- Pour démarrer le groupe MG mettre sur ON le disjoncteur du boîtier de contrôle moteur le voyant rouge STOP s'illumine et on entend tourner les ventilateurs de refroidissement.

Vérifier la présence des tensions de phase et des thyristors par les 6 ouvertures dans le bas du boîtier.

- Presser le bouton vert ON pour démarrer le groupe. Le courant de démarrage s'établit aux environ de 700 A pendant 30 s pour tomber à 60 A en marche à vide.

ATTENTION : À ce point le 600 V est présent jusqu'aux contacts supérieurs du disjoncteur du circuit d'essai.

5.2 Les alimentations de commande

Chaque boîtier fixé au mur reçoit une alimentation 120V ac de la nourrice attachée sur la barre de MALT, excepté le disjoncteur qui a sa propre prise 120V ac dans le coin.

- Presser l'interrupteur de la nourrice pour alimenter tous les boîtiers

6 L'acquisition de donnée

Le boîtier d'acquisition de données renferme un PCB pouvant recevoir jusqu'à 16 modules de mesure opto-isolés dont la sortie est un signal de +ou- 5 V. Les canaux 13,14,15 et 16 sont contournés pour utiliser les sondes externes de tension et de courant selon l'assignation suivante:

Canal 13: Tension source V_{source} ratio 500:1,

Canal 14: Tension limiteur V_{lim} ratio 500:1 ou ratio 50:1 selon le type de mesure,

Canal 15: Courant limiteur faible amplitude $I_{lim\ low}$ ratio 40:1 (1 A donne 25 mV),

Canal 16: Courant limiteur forte amplitude $I_{lim\ high}$ ratio 100:1 (10 mV/A).

Les sondes de tension mesure jusqu'à 1000 V avec le ratio 500:1 et 100 V avec le ratio 50:1, la sonde de courant faible amplitude mesure jusqu'à 300 A instantanés et la sonde de courant forte amplitude mesure jusqu'à 400 A ca efficaces avec un I_r de 22 A/s.

NE PAS OUBLIER D'ALLUMER LES SONDES DE MESURE DE TENSION ET DE VÉRIFIER L'ÉTAT DES PILES. (LES ÉTEINDRE EN PARTANT)

7 Programmation d'une séquence

Suivre les instructions dictés par le programme.

- Entrer le nom de la mesure en huit caractères sans extension. La date et l'heure sera spécifiée par l'ordinateur. les extensions .NIC, .HSV et .DMM seront assignées automatiquement pour les données du NIColet, du High Speed Voltmeter (Keithley 194A) et du Digital Multi-Meter (Keithley 2001).
- Entrer les constantes de calibrage des sondes mesurées par le Nicolet (ex. 500, 500, 40, 100 pour V_{source} , V_{lim} , $I_{lim\ low}$, $I_{lim\ high}$ sur les voies 1,2,3 et 4 du Nicolet). Les valeurs sauvegardées sur fichier auront les véritables valeurs en volts et ampères.
- Entrer une séquence d'essai sans dépasser les limites indiquées ci-dessous:

2,1 cycles	< PRE-TRIG <	NOMINAL + 2 cycles
1 cycle	< NOMINAL <	limité par le Stanford DG535 (cycles entiers)
1 cycle	< FAULT <	limité par le Stanford DG535
0	< ANGLE <	fraction d'un cycle seulement

Remarque: ANGLE = 0,25 correspond à l'initiation du défaut sur une crête positive de la tension source, 0,75 correspond à la même chose sur une crête négative.

- Valider la séquence (taper y ou Y)
- Vérifier une dernière fois tous les paramètres de la séquence et les calibres des instruments avant de déclencher l'exécution de l'essai programmé par un double retour-chariots.

**ANNEXE V: ANALYSE HARMONIQUE DE LA TENSION
ALTERNATEUR AVEC MATLAB**

```

% Ce programme exécute une analyse spectrale de la tension ligne-ligne V12
% de l'alternateur durant un défaut afin d'en extraire les harmoniques
% caractéristiques. Cette analyse est faite à l'aide de la fonction fft(X), X étant le
% vecteur colonne de la tension alternateur

% Paramètres à modifier avant une simulation
Fs= 10000;           % fréquence d'échantillonnage du signal à analyser
N = 172;             % nombres d'échantillon mesurés
F_Nyquist=Fs/2;      % fréquence de Nyquist

load def77a33.nic;    % crée la matrice simgen01 (1000 x 5)
V12 = def77a33(540:625,2); % extrait un demi-cycle de tension en défaut (col. 2)
V12 = [-V12;V12];     % recré une alternance parfaitement symétrique
t = (0:0.1:17.1)/1000; % génère un vecteur temps de 0 à 17,1 ms

plot(t,V12);
title('Tension alternateur a 100kVA')
xlabel('Temps en secondes')
ylabel('Amplitude en volts')
grid
pause

Y = fft(V12,N);        % transformée de Fourier
A = 2*abs(Y(1:N/2))/N; % amplitudes des harmoniques
P = angle(Y(1:N/2));   % phases des harmoniques

pas_freq=Fs/N;         % pas des fréquence
f=(0:N/2)*pas_freq;     % vecteur de fréquence

bar(f(1:85),A(1:85))    % tracé des amplitudes
title('Amplitude des harmoniques')
xlabel('Fréquence en Hz')
ylabel('Amplitude en V')
grid

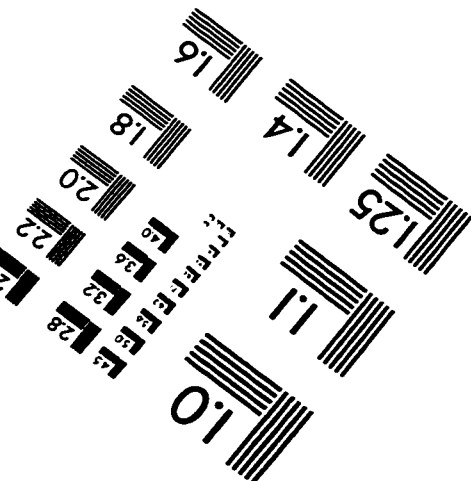
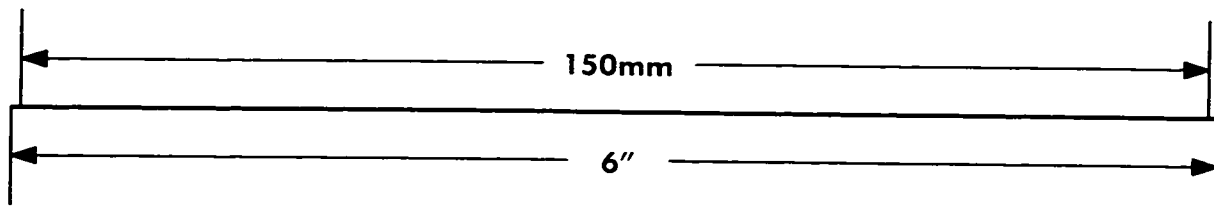
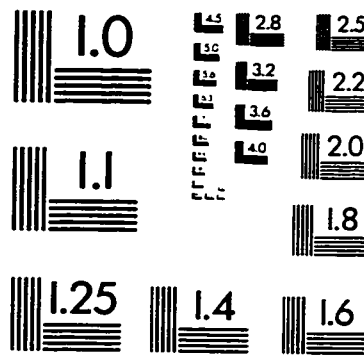
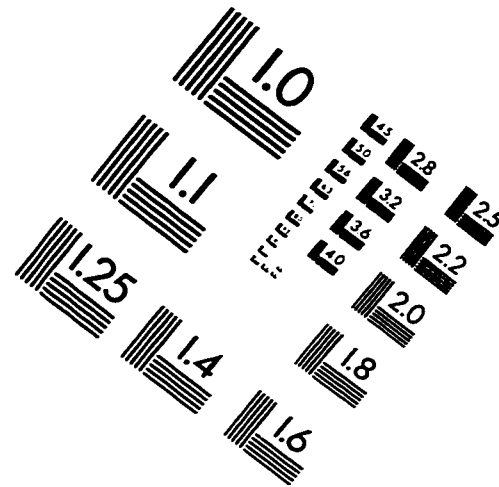
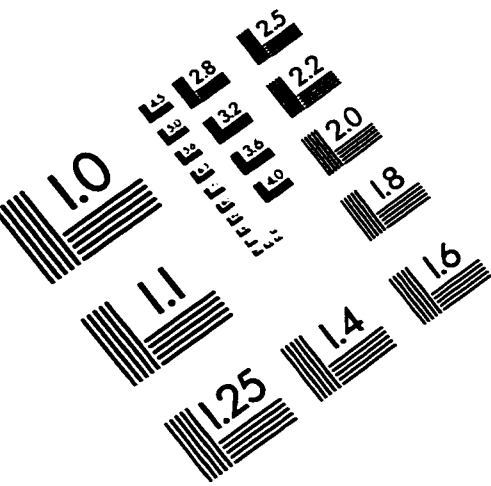
```

pause

```
H1 = A(2)*cos(2*pi*f(2)*t+P(2)); % fondamental à 58 Hz
H3 = A(4)*cos(2*pi*f(4)*t+P(4)); % harmonique 3 à 174 Hz
H5 = A(6)*cos(2*pi*f(6)*t+P(6)); % harmonique 5 à 290 Hz
H7 = A(8)*cos(2*pi*f(8)*t+P(8)); % harmonique 7 à 406 Hz
V = H1+H3+H5+H7; % série de Fourier jusqu'à l'harmonique 7
```

```
plot(t, V, 'b', t, H1, 'r', t, H3, 'g', t, H5, 'm', t, H7, 'k', t, V);
title('Approximation aux 4 premiers harmoniques')
xlabel('Temps en secondes')
ylabel('Tension en volts')
grid
```

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved

